

Estudo do Efeito no Nível trófico do Estuário do Tejo da Remoção de Nutrientes nas ETAR de Alcântara, Chelas, Beirolas e S. João da Talha

Data: 15-11-2006

Autores:

Sofia Saraiva

Frank Braunschweig

Ramiro Neves



Coordenador

(Professor Ramiro Neves)

Principais Investigadores

(Sofia Saraiva)

(Frank Braunschweig)



## Resumo

O presente estudo tem como principal objectivo a avaliação dos efeitos da remoção de nutrientes pelas ETAR de Alcântara, Chelas, Beirolas e S. João da Talha, no nível trófico do Estuário do Tejo.

O estudo encontra-se organizado em três partes distintas que se interligam e complementam, no sentido de responder ao objectivo pretendido:

- (i) análise dos dados de campo recentes no Estuário do Tejo;
- (ii) aplicação um modelo matemático no Estuário do Tejo capaz de simular os processos tróficos existentes no sistema;
- (iii) criação de cenários de gestão alternativos, em termos de propriedades dos efluentes descarregados pelas ETAR, e sua análise face à situação actual utilizando o modelo matemático.

Os dados de campo mais recentes resultam do programa de monitorização ambiental da SIMTEJO no Estuário do Tejo e correspondem a amostragens mensais realizadas, entre Fevereiro de 2004 e Janeiro de 2006, numa quinzena de estações dispersas ao longo de todo o Estuário do Tejo. Este vasto conjunto de dados permite caracterizar com algum detalhe a situação actual do estuário em termos de qualidade da água.

Em traços gerais, os dados permitem concluir que o Estuário do Tejo é caracterizado por uma variabilidade importante ao nível da concentração de nutrientes e clorofila, com gradientes horizontais (de montante para jusante) bastante acentuados como consequência da forte influência, a montante, das descargas dos rios Tejo, Sorraia e Trancão, e a jusante das trocas com o oceano. A variação sazonal das propriedades é também evidente: as concentrações mais elevadas de nutrientes surgem durante os meses de Outono/Inverno; durante a Primavera/Verão os valores de concentração de nutrientes são mais baixos devido ao facto de este ser o período no qual a actividade fotossintética é mais intensa. Com o aumento de radiação e temperatura no sistema a produção primária é mais importante, o que se reflecte no maior consumo de nutrientes.

Assim, a qualidade da água no Estuário do Tejo surge como a combinação e interligação de dois tipos de processos: (i) processos físicos que resultam da existência de um escoamento de maré e descargas importantes de água doce que determinam o tempo de residência (e o processo de mistura com a água do mar) e a turbidez do estuário (ii) processos químicos/biológicos que são intensos em alguns períodos do ano.

A aplicação do modelo matemático para reproduzir o ano de 2005 revela resultados bastante concordantes com a generalidade dos dados de campo e permite ainda um complemento importante na

análise da variabilidade das propriedades, contribuindo para a compreensão dos principais processos existentes no sistema. Os resultados do modelo confirmam que o Estuário do Tejo é um sistema produtivo, com maior produção primária durante a Primavera/Verão, devido ao controlo pela disponibilidade de luz na coluna de água. A concentração de nutrientes é determinada sobretudo pelas descargas dos rios, sendo mais elevada nas zonas de montante do estuário e durante o inverno quando os caudais são mais elevados e o consumo é menor. A dinâmica de sedimentos no estuário é também muito intensa, devido não só à mistura entre água doce e salina e ao efeito da maré mas também devido à ondas geradas pelo vento. A concentração de sedimentos é, segundo as medidas e corroborando com hipóteses já descritas na literatura, o principal factor de aumento de turbidez da coluna de água. Assim, o estuário do Tejo é em geral um estuário turvo, onde a luz penetra com dificuldade, limitando a produção primária.

O modelo permite ainda confirmar que é possível distinguir no estuário do Tejo zonas com diferentes “funções” (i) as zonas de baixa profundidade, com tempo de residência elevado e com maior disponibilidade de luz por unidade de volume são zonas com produtividade mais elevada e simultaneamente são zonas com condições preferenciais de deposição de materiais finos e por isso zonas de mineralização intensa da matéria orgânica e (ii) zonas mais profundas, com hidrodinâmica intensa, tempo de residência baixo ou seja zonas essencialmente de transporte.

Caracterizada a situação actual do estuário e validada uma ferramenta numérica, que permite simular os principais processos físicos, químicos e biológicos, é então possível prever comportamento do sistema quando sujeito a alterações. O presente estudo engloba a análise de dois cenários de descarga de nutrientes: (i) Licença de Descarga e (ii) Descarga Nula. Os cenários diferem apenas na concentração de nutrientes presente nos efluentes das ETAR de Alcântara, Chelas, Beirolas e S.João da Talha. O segundo cenário corresponde a uma situação extrema, onde a remoção de nutrientes seria de 100% e pretende demonstrar que os nutrientes provenientes das descargas urbanas têm uma importância marginal para o nível trófico do estuário. Os resultados do modelo evidenciam que os efeitos provocados pelas alterações impostas nestes dois cenários são, em termos do nível trófico do sistema inferiores a 1%. Ao nível das concentrações de nutrientes no interior do estuário existe uma diminuição máxima de cerca de 30% nas concentrações de amónia e inferior a 10% no caso do nitrato e fósforo inorgânico, com um aumento de cerca de 15-20% na concentração de fósforo inorgânico no Cenário 1 por o valor limite definido na licença de descarga ser superior ao valor actualmente emitido pelas ETAR. O facto de a diferença máxima de fitoplâncton em ambos entre cenários ser inferior a 1% é uma consequência da dinâmica de produção primária no Estuário do Tejo que, sendo limitada pela disponibilidade de luz e não pela concentração de nutrientes, consome só uma pequena parte dos nutrientes disponíveis, sendo a parte não

consumida muito superior à descarga de nutrientes provenientes das fontes urbanas. Este mecanismo de funcionamento do estuário foi posto em evidência em estudos anteriores (Pina, 2001; Saraiva, 2001; INAG/MARETEC, 2002) e é demonstrado pelos dados de campo recolhidos durante o programa de monitorização implementado pela SimTejo. A capacidade do modelo em descrever e prever os principais processos que ocorrem no meio estuarino, em particular no Estuário do Tejo é assim reforçada neste estudo, tornando-o numa ferramenta útil não só para a análise de diagnóstico do estuário, mas principalmente em termos da complexa gestão do recurso.



# Índice

<b>I. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>II. Metodologia .....</b>	<b>5</b>
<b>III. Programa de Monitorização Ambiental dos Meios Receptores da SIMTEJO:</b>	
<b>Componente Estuário do Tejo .....</b>	<b>6</b>
<b>1 Breve descrição .....</b>	<b>6</b>
<b>2 Síntese dos resultados do Programa de Monitorização.....</b>	<b>7</b>
<b>IV. Modelação Ambiental.....</b>	<b>15</b>
<b>1 MOHID Water Modelling System .....</b>	<b>15</b>
<b>2 Implementação do modelo .....</b>	<b>20</b>
2.1 Sistema de Modelos Encaixados.....	20
2.2 Condições Fronteira .....	22
2.2.1 Atmosfera.....	22
2.2.2 Oceano.....	23
2.2.3 Descargas.....	24
2.2.3.1 Rios Afluentes.....	25
2.2.3.2 Águas Residuais Urbanas .....	29
2.2.3.3 Input Total de Nutrientes: quantificação relativa.....	31
<b>3 Situação de Referência .....</b>	<b>33</b>
3.1 Hidrodinâmica do Sistema.....	33
3.2 Qualidade da Água.....	36
3.2.1 Séries Temporais do modelo vs. Dados de Campo.....	36
3.2.2 Distribuição Espacial das Propriedades.....	43
3.2.3 Diferentes Zonas do Estuário.....	45
3.2.3.1 Concentração em diferentes zonas do Estuário.....	46
3.2.3.2 Fluxos de Massa entre diferentes zonas do Estuário.....	47
3.2.4 Factores Limitantes da produção primária .....	51
<b>4 Cenários de Gestão .....</b>	<b>53</b>
4.1 Variabilidade Espacial .....	55
4.2 Variabilidade Sazonal .....	57
4.3 Balanço Global das Propriedades .....	63
<b>V. Conclusões .....</b>	<b>65</b>



# Índice de Figuras

Figura 1. Estações de Amostragem pertencentes ao Programa de Monitorização Ambiental do Estuário do Tejo (SIMTEJO).....	6
Figura 2. Amostragem 2004/2005 no Estuário do Tejo: Nitrato vs. Salinidade .....	8
Figura 3. Caudal do Rio Tejo em 2004 e 2005.....	8
Figura 4. Amostragem 2004/2005 no Estuário do Tejo: distribuição de Nitrato. ....	9
Figura 5. Amostragem 2004/2005 no Estuário do Tejo: distribuição de Amónia.....	10
Figura 6. Amostragem 2004/2005 no Estuário do Tejo: distribuição de Fósforo Total.....	11
Figura 7. Amostragem 2004/2005 no Estuário do Tejo: distribuição de Clorofila.....	12
Figura 8. Resultados de Amostragem Clássica: Turvação vs. Sólidos Suspensos Totais.....	13
Figura 9. Resultados de Amostragem Clássica: Clorofila vs. Turbidez.....	13
Figura 10. Resultados de Amostragem Clássica: Clorofila vs. Amónia e Clorofila vs. Nitrato.....	14
Figura 11. Batimetria da aplicação de larga escala (Nível 1).....	21
Figura 12. Batimetria utilizada na aplicação do Estuário do Tejo (Nível 2).....	21
Figura 13. Malha utilizada na aplicação do Estuário do Tejo, Nível 2 (ampliação da região interior do estuário).....	22
Figura 14. Localização da Série Temporal de Valores do modelo MM5.....	23
Figura 15. Localização das descargas de água doce consideradas na modelação ecológica.....	25
Figura 16. Localização das estações de amostragem do INAG utilizadas para a caracterização dos rios.....	26
Figura 17. Série Temporal de Caudal do Rio Tejo e Rio Sorraia no ano de 2005.....	27
Figura 18. Série Temporal de caudal do Rio Trancão no ano de 2005.....	27
Figura 19. Estações de amostragem SIMTEJO utilizadas na caracterização dos rios.....	28
Figura 20. Série temporal de valores impostos para as descargas dos principais rios afluentes.....	29
Figura 21. Contribuição Relativa das diversas descargas existentes no Estuário do Tejo.....	32
Figura 22. Campo de velocidade no Estuário do Tejo em situação de enchente.....	33
Figura 23. Campo de velocidade no Estuário do Tejo em situação de vazante.....	34
Figura 24. Campo residual de velocidade no Estuário do Tejo (jusante e montante).....	34
Figura 25. Fluxo residual no Estuário do Tejo.....	35
Figura 26. Localização das estações de amostragem utilizadas na validação dos resultados da modelação ecológica.....	36

Figura 27. Estação de Amostragem ST91: Resultados do Modelo vs. Dados de Campo. ....	38
Figura 28. Estação de Amostragem ST81: Resultados do Modelo vs. Dados de Campo. ....	39
Figura 29. Estação de Amostragem ST74: Resultados do Modelo vs. Dados de Campo. ....	40
Figura 30. Estação de Amostragem ST53: Resultados do Modelo vs. Dados de Campo. ....	41
Figura 31. Estação de Amostragem ST12: Resultados do Modelo vs. Dados de Campo. ....	42
Figura 32. Situação de Referência: distribuição média nos meses de Fevereiro e Julho de 2005.....	45
Figura 33. Caixas de Integração consideradas no estudo de modelação de qualidade da água do Estuário do Tejo. ....	46
Figura 34. Concentração média anual das propriedades nas diferentes zonas do Estuário do Tejo.....	47
Figura 35. Evolução Sazonal das Propriedades nas Caixas 2 e 10. ....	47
Figura 36. Fluxo Médio Anual de Fitoplâncton entre zonas do estuário.....	48
Figura 37. Fluxo Médio Anual de Amónia entre zonas do estuário. ....	49
Figura 38. Fluxo Médio Anual de Nitrato entre zonas do estuário. ....	49
Figura 39. Fluxo Médio Anual de Fósforo Inorgânico entre zonas do estuário. ....	50
Figura 40. Balanço Global do Estuário na Situação de Referência. ....	51
Figura 41. Factores Limitantes da Produção Primária na caixa 10.....	52
Figura 42. Localização das ETAR em estudo.....	53
Figura 43. Cenário 1 (Licença de Descarga) vs. Situação de Referência: diferença relativa da distribuição média.....	57
Figura 44. Cenário 2 (Descarga Nula) vs. Situação de Referência: diferença relativa da distribuição média.....	58
Figura 45. Estações de Amostragem utilizadas na comparação de cenários. ....	59
Figura 46. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST91: comparação de Cenários .....	60
Figura 47. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST73: comparação de Cenários .....	60
Figura 48. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST74: comparação de Cenários .....	61
Figura 49. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST63: comparação de Cenários .....	61
Figura 50. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST53: comparação de Cenários .....	62
Figura 51. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST32: comparação de Cenários .....	62
Figura 52. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST12: comparação de Cenários .....	63
Figura 53. Balanço Global das Propriedades no Estuário: comparação de cenários.....	64

## Índice de Tabelas

Tabela 1. Características da fronteira marítima.....	24
Tabela 2. Valores Típicos de propriedades nos efluentes das ETAR (Metcalf and Eddy, 1991).....	29
Tabela 3. Valores Típicos de eficiência de remoção das propriedades em ETAR (Metcalf and Eddy, 1991).....	30
Tabela 4. Características do efluente actual da ETAR de Alcântara. ....	30
Tabela 5. Características do efluente actual da ETAR de Beirolas. ....	30
Tabela 6. Características do efluente actual da ETAR de Chelas.....	31
Tabela 7. Características do efluente actual da ETAR de S. João da Talha. ....	31
Tabela 8. Características do efluente actual das restantes ETAR consideradas. ....	31
Tabela 9. Valores impostos na licença de descarga.....	53
Tabela 10. Descarga da ETAR de Alcântara: valores considerados nos cenários em estudo. ....	54
Tabela 11. Descarga da ETAR de Beirolas: valores considerados nos cenários em estudo. ....	54
Tabela 12. Descarga da ETAR de Chelas: valores considerados nos cenários em estudo. ....	54
Tabela 13. Descarga da ETAR de S. João da Talha: valores considerados nos cenários em estudo. ....	55
Tabela 14. Influência da redução de nutrientes na produção de Fitoplâncton no Estuário do Tejo.....	64



# I. Introdução

## **Objectivo**

O presente estudo tem como principal objectivo a avaliação dos efeitos da remoção de nutrientes pelas ETAR de Alcântara, Chelas, Beirolas e S. João da Talha, no nível trófico do Estuário do Tejo. O problema é analisado de forma qualitativa com base em dados de campo recentes, resultantes do programa de monitorização da SIMTEJO no Estuário do Tejo e de forma quantitativa através da aplicação de um modelo matemático – MOHID - que permite simular os principais processos físicos, químicos e biológicos no estuário (ver [www.mohid.com](http://www.mohid.com)).

## **Enquadramento**

Os produtores primários, em particular o fitoplâncton, são a base da cadeia trófica no meio marinho. A sua evolução diária, sazonal e interanual, bem como a sua distribuição espacial, permitem induzir sobre a dinâmica ecológica do estuário e consequentemente sobre o seu nível trófico. Perturbações na evolução desta propriedade associadas, por exemplo, a perturbações na evolução de concentração de nutrientes, poderão reflectir-se na dinâmica do sistema e consequentemente em alterações no nível trófico.

Sendo assim, poderemos afirmar que, não existindo alterações significativas na evolução de fitoplâncton no interior do estuário não serão de esperar alterações no nível trófico do sistema. Deste modo, o estudo aqui apresentado, desenvolvido com o intuito de avaliar alterações no nível trófico do Estuário do Tejo centra-se na análise das concentrações de fitoplâncton e da sua relação com as concentrações de nutrientes. O estudo pretende pôr em evidência que a uma redução das concentrações de nutrientes só corresponde uma redução de produção primária se esta for limitada pelos nutrientes. Se não for limitada pelos nutrientes, só ocorrerá redução da produtividade do estuário se a redução de nutrientes for superior à quantidade em excesso.

A primeira parte do estudo analisa os dados de campo recolhidos recentemente no Estuário do Tejo em particular os dados resultantes do programa de monitorização da SIMTEJO e pretende demonstrar a partir desses dados quais são os processos que determinam o nível trófico no estuário. Os dados mostram que (i) os nutrientes nunca são esgotados, (ii) existe uma boa correlação entre a concentração de nitrato e salinidade (iii) o fósforo e o azoto estão em proporções próximas das de Redfield (iv) a clorofila tem uma correlação negativa com a turbidez. Os dados de campo sugerem que a produção primária é limitada pela penetração da luz e não pelos nutrientes e por conseguinte a redução da carga de nutrientes não tem necessariamente como consequência a redução do nível trófico.

A segunda parte do estudo baseia-se na aplicação do modelo MOHID, validado com os dados do programa de monitorização. A análise dos resultados mostra que o modelo reproduz os processos mais relevantes para o funcionamento do estuário postos em evidência pelos dados de campo, o que permite quantificar as implicações da redução das descargas de nutrientes de origem urbana. O modelo foi inicializado com os dados de campo de 2004 e validados com os dados de 2005, que foi usado como ano de referência no estudo.

Após a validação dos resultados do modelo com os dados de campo, isto é confirmado que o modelo reflecte satisfatoriamente a evolução das propriedades ao longo do ano, é possível avançar para a etapa final do estudo, que consiste na previsão numérica dos efeitos na evolução das propriedades provocados pela introdução de perturbações no sistema, neste caso, ao nível das descargas de efluentes de quatro das ETAR geridas pela SIMTEJO. São assim, criados dois cenários que pretendem reproduzir condições de descarga distintas das de referência: (i) descarga conforme a Licença de Descarga e (ii) descarga considerando uma eficiência hipotética de 100% na remoção de nutrientes feita nas ETAR. A comparação de cada um dos cenários de gestão com a situação de referência e também entre si, permitirá induzir sobre as possíveis alterações provocadas ao nível das concentrações de nutrientes e também de fitoplâncton – uma das “medidas” do nível trófico do sistema.

Estudos anteriores (Pina, 2001; INAG/MARETEC, 2002; Saraiva *et al.* apresentam a luz como o principal factor limitante da produção primária no estuário do Tejo em consequência da elevada concentração de sedimentos na coluna de água que condicionam a turbidez do estuário. Assim, a concentração de fitoplâncton no sistema apresenta-se, no Estuário do Tejo, mais dependente da disponibilidade de luz do que propriamente da concentração de nutrientes, como em grande parte dos sistemas marinhos. Neste sentido, uma diminuição da concentração de nutrientes disponíveis no sistema terá um impacte mínimo (1%) na produção global de fitoplâncton no estuário. Em Saraiva (2001) e INAG/MARATEC (2002) foram realizados estudos de modelação que permitem concluir que a remoção de nutrientes em todas as ETAR como uma eficiência de 100% e a remoção de 50% do *input* de nutrientes vindo do Rio Tejo teriam um impacte residual sobre a biomassa total. Este resultado é uma consequência do factor limitante da luz ser neste estuário um mais importante no controlo da produção primária do que os restantes factores.

O facto de as conclusões deste estudo serem semelhantes às dos estudos anteriores reforça aquelas conclusões porque o estudo actual dispõe de um conjunto consistente de dados e o modelo foi sendo objecto de melhoramentos, incluindo agora o ciclo do fósforo. A inclusão de novos processos e a manutenção das conclusões mostra que esses novos processos não são determinantes para simular a produção primária no estuário. É o caso do fósforo, que não sendo um factor limitante não necessita efectivamente de ser simulado.

A sua simulação tem no entanto duas vantagens (a) mostra que o modelo simula bem a sua dinâmica e (b) consequentemente reforça a validade dos resultados do modelo.



## II. Metodologia

A metodologia seguida para alcançar o objectivo proposto recorre a vários tipos de informação, incluindo dados de campo provenientes de diversas entidades e a utilização de um modelo matemático, sendo o relatório organizado de acordo com metodologia de trabalho. O **Capítulo III** descreve os dados de campo e o **Capítulo IV** descreve o modelo e os resultados da aplicação, incluindo a validação dos resultados do modelo na Situação de Referência (ano de 2005), através da sua comparação com os dados de campo disponíveis para aquele ano. A opção de escolha deste ano particular prende-se com a maior disponibilidade de dados, não só relativos às concentrações das propriedades no interior do estuário mas também para a caracterização das condições de fronteira do sistema.

Os resultados do modelo são explorados, analisando a evolução espacial e sazonal das várias propriedades relevantes para o estudo, nas várias zonas do estuário. O modelo foi posteriormente utilizado para simulação de dois cenários de remoção de nutrientes (i) considerando os valores impostos na licença de descarga das ETAR de Alcântara, Chelas, Beirolas e S. João da Talha; (ii) considerando eficiências 100% na remoção de nutrientes nas referidas ETAR. Os resultados do modelo nos dois cenários são então comparados com os resultados da simulação da Situação de Referência no sentido de detectar alterações nas propriedades que condicionam o nível trófico do estuário.

### III. Programa de Monitorização Ambiental dos Meios

#### Receptores da SIMTEJO: Componente Estuário do Tejo

##### 1 Breve descrição

A Figura 1 representa a localização de as estações de amostragem pertencentes ao Programa de Monitorização Ambiental do Estuário do Tejo (SIMTEJO) onde são medidas grandezas referentes aos processos biogeoquímicos relevantes para a avaliação do nível trófico no estuário. O programa teve início em Fevereiro de 2004, tendo sido medidos mensalmente nestas estações os parâmetros relevantes no estudo dos processos tróficos: concentrações de nitrato, amónia, fósforo total, clorofila e oxigénio dissolvido.

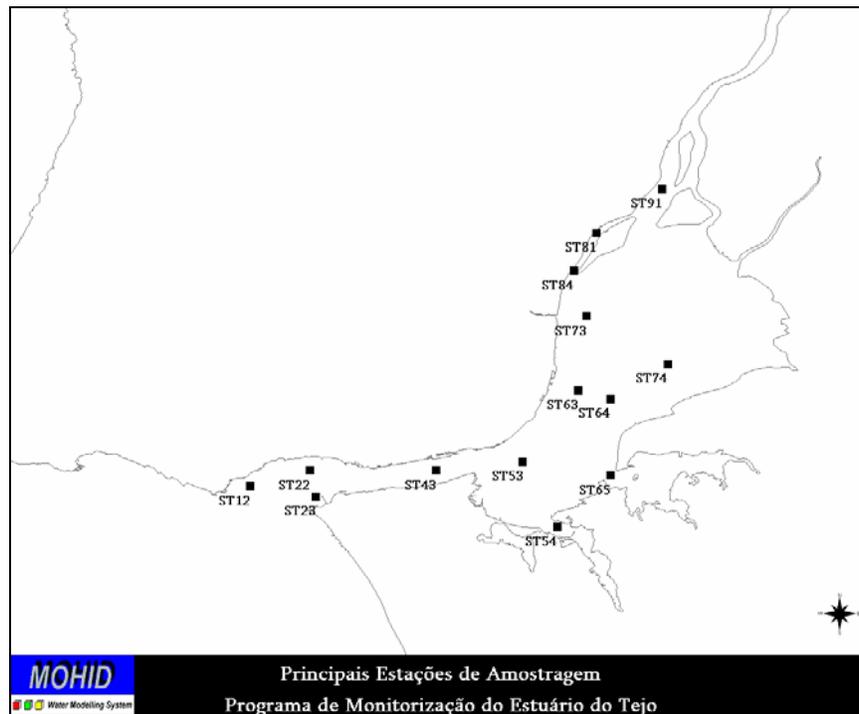


Figura 1. Estações de Amostragem pertencentes ao Programa de Monitorização Ambiental do Estuário do Tejo (SIMTEJO).

O programa de monitorização inclui ainda a amostragem mensal de três estações próximas da zona de afluência dos três principais rios que desaguam no Estuário do Tejo – Tejo, Sorraia e Trancão – e ainda a amostragem nos efluentes das ETARs geridas pela SIMTEJO, nos mesmos dias de amostragem no interior do estuário.

## 2 Síntese dos resultados do Programa de Monitorização

Globalmente pode dizer-se que grande parte dos parâmetros amostrados apresenta concentrações decrescentes de montante para jusante como resultado de um efeito de diluição com água do mar devida ao escoamento intenso promovido pela maré. As concentrações de nitrato são um exemplo deste efeito, apresentando valores mais elevados na zona das descargas dos Rios, tipicamente de 1.5 mgN/l no Tejo e Sorraia e de 6 mgN/l no Trancão. Se a diluição fosse o único mecanismo de redução da concentração (e os rios tivessem todos a mesma concentração), um gráfico representando a concentração de nitrato em função da salinidade teria uma evolução linear segundo a recta apresentada na Figura 2. A figura representa os resultados das amostragens realizadas em 2004 e 2005. O Rio Tejo é a principal fonte de água doce e por isso determina a distribuição de salinidade no estuário. Assim, os pontos acima da recta são pontos onde há produção ou descargas com concentrações mais elevadas do que as provenientes do Tejo e os pontos abaixo da recta são pontos de consumo. A recta foi desenhada admitindo uma concentração no rio de 1.5 mgN/l e uma concentração no mar de 0.2. A figura permite assim concluir que o nitrato existente no estuário tem como principal origem uma fonte de água doce: o Rio Tejo, que é o mais caudaloso.

Outro aspecto interessante é a variabilidade interanual. Em 2005 os pontos estão bastante mais acima da recta do que em 2004. Esta diferença pode ser interpretada tendo em consideração os caudais dos rios, os tempos de residência e a mineralização de matéria orgânica nos sedimentos. A Figura 3 representa os caudais do Rio Tejo em 2004 e em 2005, sendo estes últimos muito inferiores aos de 2004, devido à seca verificada nesse ano. Como consequência da redução dos caudais, o tempo de residência aumenta e aumenta também a salinidade média no estuário. O aumento do tempo de residência permite que mais matéria orgânica seja mineralizada no interior do estuário, aumentando a produção de nitratos e subindo os pontos em relação à recta. O aumento da salinidade desloca os pontos para a direita, colocando-os acima da recta por esta ter um declive negativo. Deste modo, o nitrato regenerado no interior do estuário por mineralização da matéria orgânica e o proveniente das descargas urbanas ficará mais acima da recta, por ser em maior quantidade e por a mineralização se fazer em zonas de maior salinidade.

A Figura 4 representa resultados do programa de monitorização, obtidos em 2004 e 2005 para a propriedade Nitrato. A figura mostra concentrações que decrescem do rio para o mar, como seria de esperar depois da análise feita na Figura 2 e também uma tendência de diminuição de concentração entre o inverno e o verão que depois da análise feita na Figura 2 se conclui ser principalmente consequência da diminuição de caudal dos rios afluentes. Este aspecto é reforçado pela comparação dos dados de 2004 e de 2005. Em 2005 as concentrações são muito baixas em toda a parte de jusante do estuário provavelmente devido aos baixos caudais durante este ano. Outro aspecto interessante destas figuras é o facto de ao longo das margens as

concentrações tenderem a ser mais elevadas do que no interior do estuário. Isto é certamente consequência directa as descargas laterais de nitrato (efluentes e pequenas ribeiras) e da mineralização da matéria orgânica depositada nas regiões de baixa profundidade e proveniente das descargas laterais, mas também do interior do estuário.

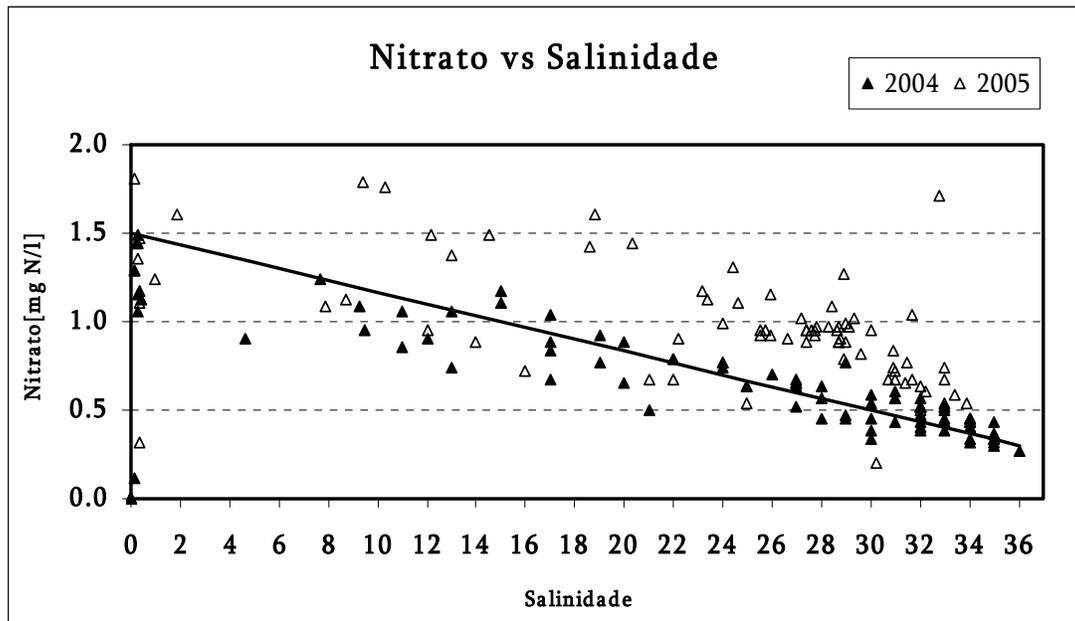


Figura 2. Amostragem 2004/2005 no Estuário do Tejo: Nitrato vs. Salinidade.

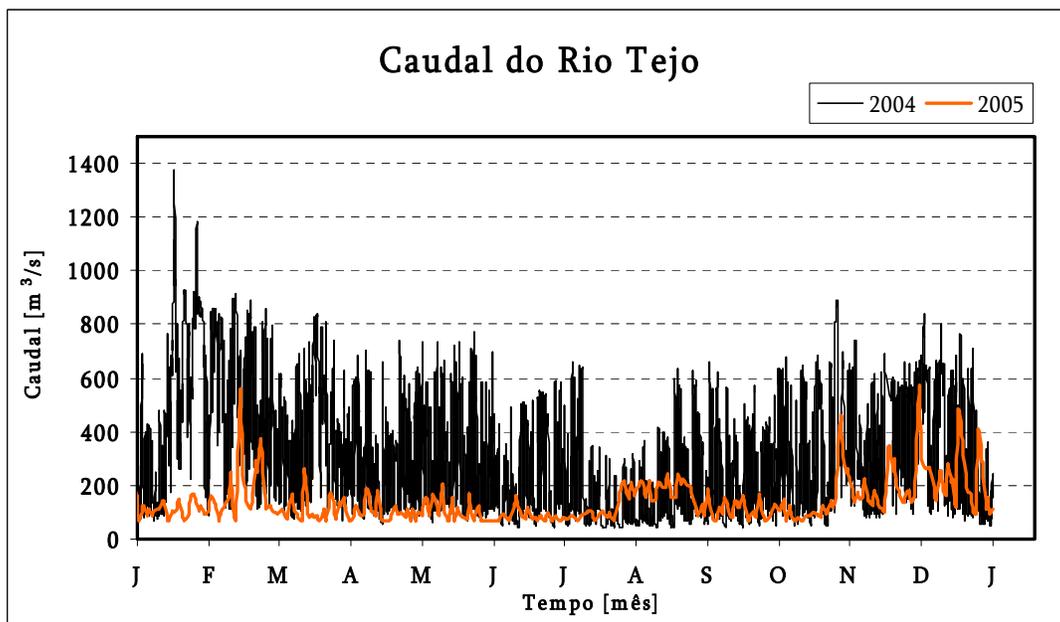


Figura 3. Caudal do Rio Tejo em 2004 e 2005.

OUTONO/INVERNO

PRIMAVERA/VERÃO

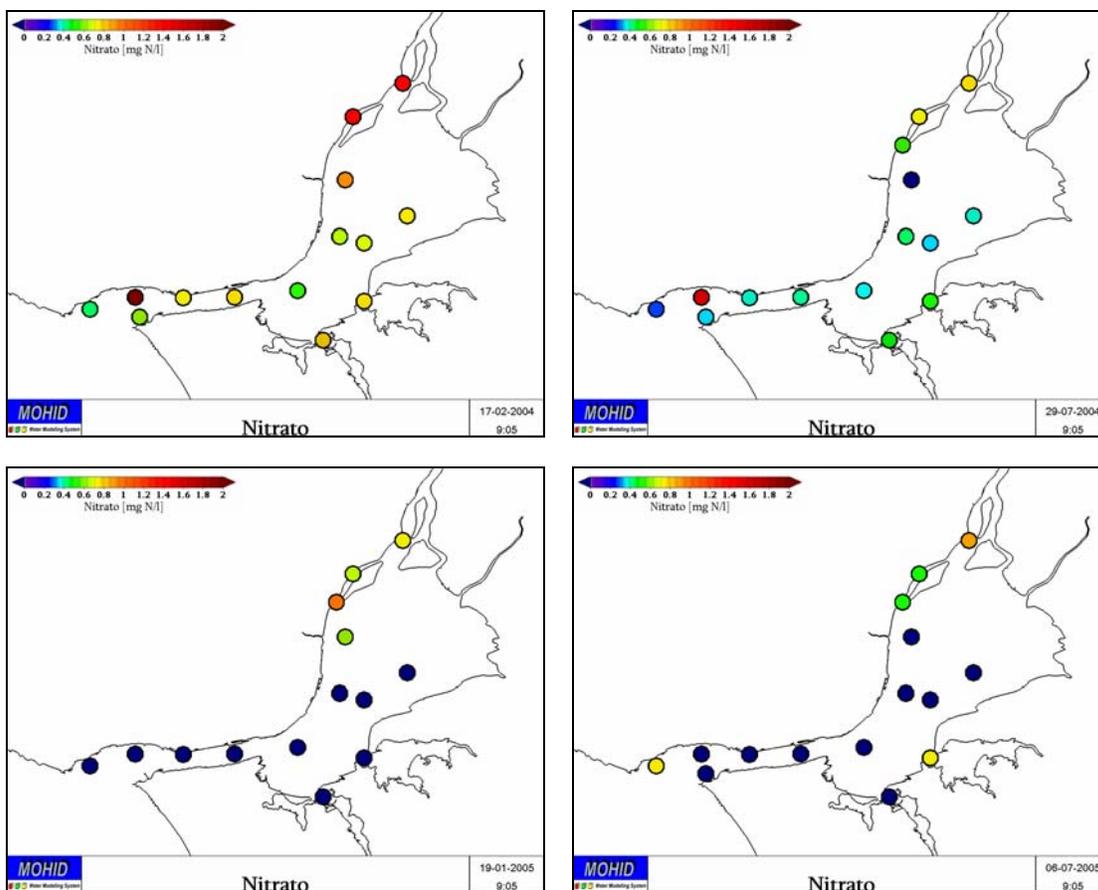


Figura 4. Amostragem 2004/2005 no Estuário do Tejo: distribuição de Nitrato.

A Figura 5 e a Figura 6 representam respectivamente a distribuição espacial de amónia e fósforo total em meses verão e de inverno. Os valores típicos rondam os 0.1 mgN/L, encontrando-se os valores mais elevados próximo das margens, em particular junto ao rio Trancão e na zona da Cala do Norte e junto aos sub-estuários da margem sul, onde as concentrações são cerca de 3 vezes superiores aos encontrados na generalidade do estuário. A redução da concentração para o interior do estuário é uma consequência da diluição, da nitrificação e dos processos de consumo. A figura evidencia também uma variação sazonal significativa, sem um padrão bem definido, devido à complexidade dos processos associados à transformação da amónia. Em 2004 a concentração é inferior no Verão, enquanto que em 2005, se passa o contrário. Relativamente ao fósforo esta sazonalidade não é tão evidente. O facto de a amostragem ser referente a fósforo total e não apenas fósforo inorgânico poderá explicar a pouca distinção entre Verão e Inverno. Durante o Inverno as concentrações de fósforo inorgânico serão elevadas e maiores que fósforo orgânico,

enquanto que no Verão, com o aumento de produção primária existe um consumo elevado de fósforo inorgânico, baixando a sua concentração. Porque o aumento da produção primária implica também um aumento de matéria orgânica no sistema a quantidade de fósforo particulado será mais elevada neste período do ano. Assim, em termos globais a variação de fósforo total poderá não ser significativa embora a variação de fósforo inorgânico o seja.

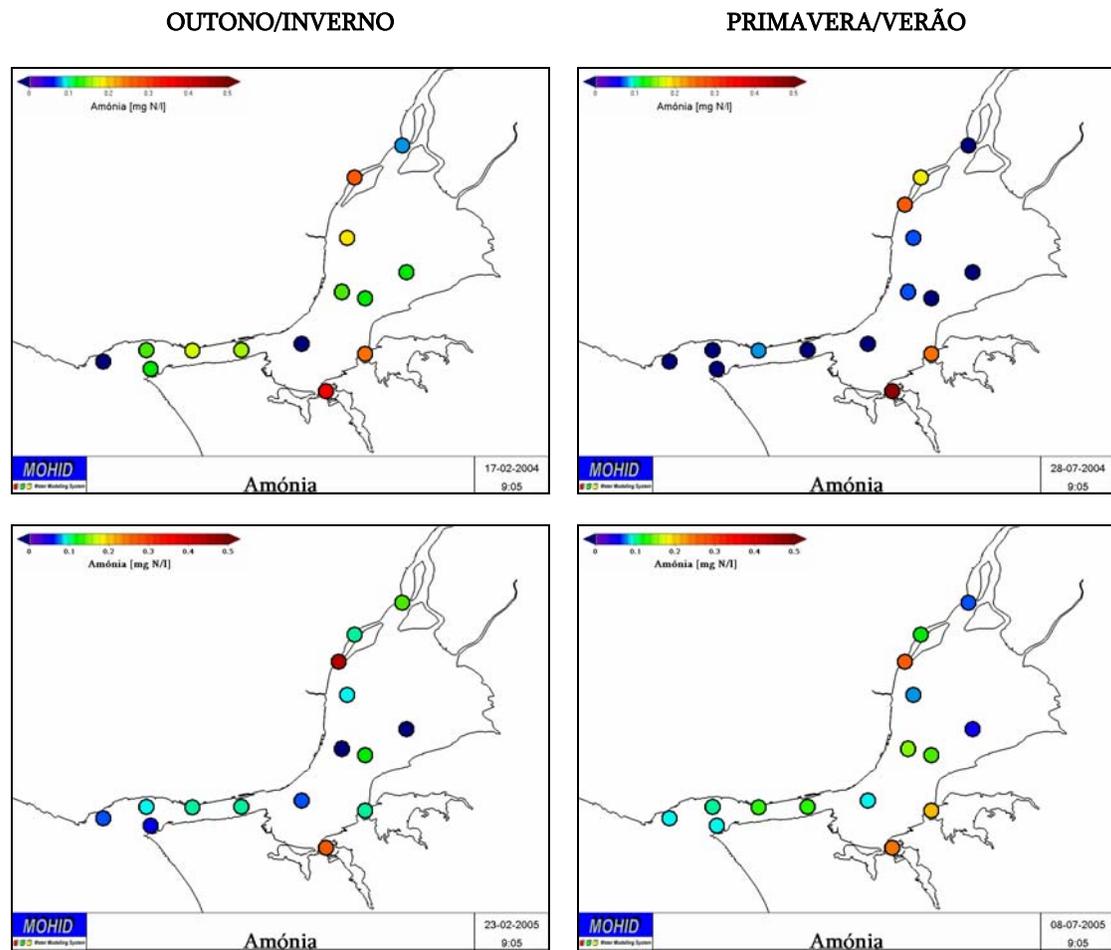


Figura 5. Amostragem 2004/2005 no Estuário do Tejo: distribuição de Amónia.

OUTONO/INVERNO

PRIMAVERA/VERÃO

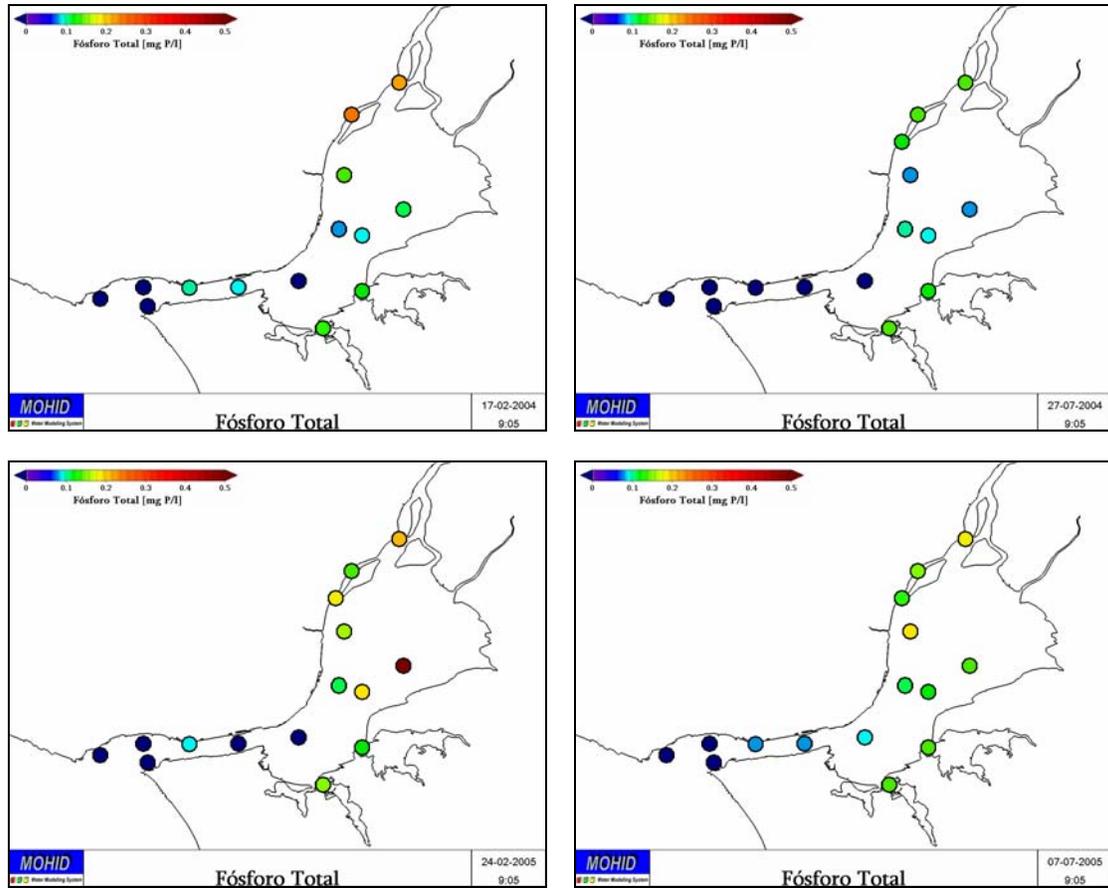


Figura 6. Amostragem 2004/2005 no Estuário do Tejo: distribuição de Fósforo Total.

A clorofila-*a* (Figura 7) apresenta valores típicos entre 5 e 10  $\mu\text{g/L}$ , que são valores moderados para um estuário. Da análise da figura torna-se evidente a importância do ciclo sazonal (Verão/Inverno) da intensidade luminosa nos organismos fotossintéticos, com um aumento de concentração entre os meses de Maio, Junho, atingido um pico em Junho/Julho. Os resultados relativos às campanhas indicam ainda uma acentuada distribuição espacial como resultado das diferentes condições existentes nas várias zonas do estuário. As zonas de montante do estuário, em particular a zona de sapal localizada na parte Este do estuário (frente a Alcochete), são zonas onde a produção primária se encontra favorecida, associando o elevado tempo de residência da água com a baixa profundidade (mais disponibilidade de luz por unidade de volume) e a existência de nutrientes (MARETEC/INAG, 2002 e Braunschweig *et al.* 2002).

OUTONO/INVERNO

PRIMAVERA/VERÃO

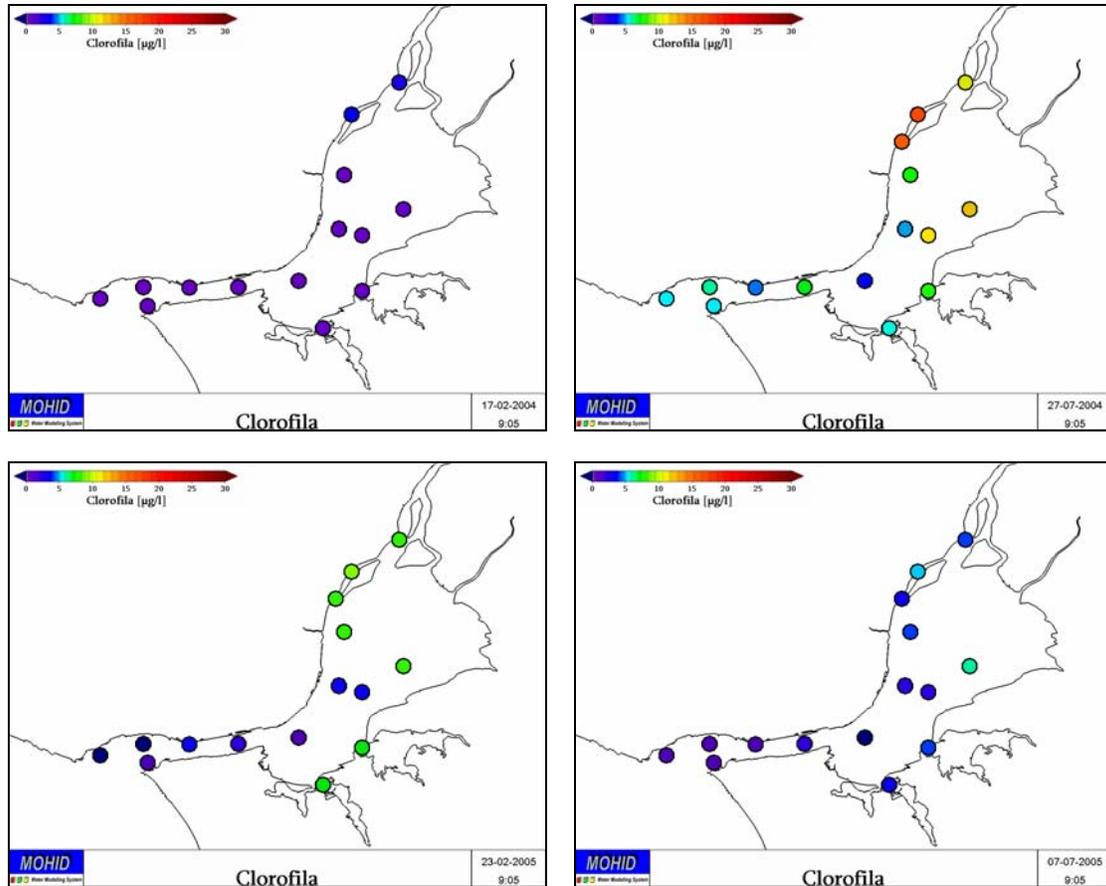


Figura 7. Amostragem 2004/2005 no Estuário do Tejo: distribuição de Clorofila.

O Estuário do Tejo possui algumas características particulares que têm como consequência o aumento de turbidez da água, acentuando a disponibilidade de luz como o factor chave para a produção primária no seu interior. A existência de extensas áreas intertidais, que contabilizam cerca de 1/3 da área total do estuário e ainda o facto de apresentar larguras típicas de 10-15 km nas direcções dominantes do vento (N-NE), proporcionam a geração de ondas no seu interior com a consequente ressuspensão de sedimentos finos de fundo, aumentando em grande medida a turbidez da água, que para além da concentração de sedimentos, depende também da concentração de matéria orgânica existente coluna de água (dissolvida e particulada), incluindo o fitoplâncton.

A Figura 8 representa, a relação entre os valores de turvação e sólidos suspensos totais, mostrando que no caso do estuário do Tejo a turbidez se deve essencialmente aos materiais particulados em suspensão. A Figura

9 representa, a relação entre os valores de clorofila-*a* e a turbidez e mostra que no Estuário do Tejo a correlação é negativa. O que põe em evidência 3 factos: (1) as partículas sem clorofila contribuem mais para a turbidez do que as que contêm clorofila e (2) valores elevados de clorofila tendem a aparecer essencialmente em situações de turbidez baixa e (3) quando a turbidez é elevada a clorofila tende a ser baixa. Esta figura mostra pois que a dinâmica da matéria em suspensão é determinante para a produção primária no estuário.

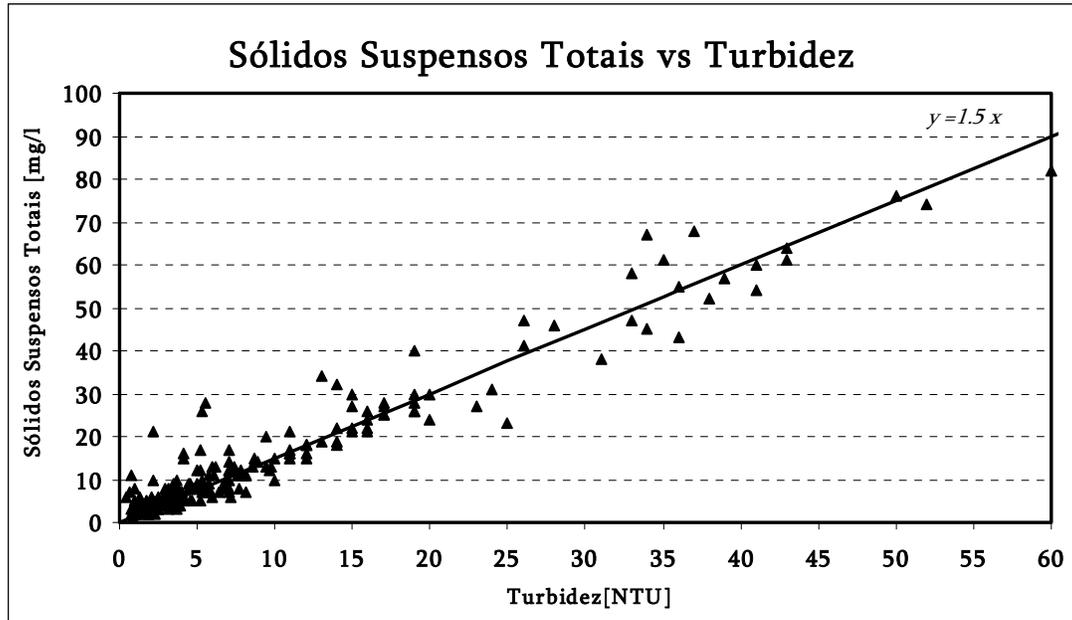


Figura 8. Resultados de Amostragem Clássica: Turvação vs. Sólidos Suspensos Totais.

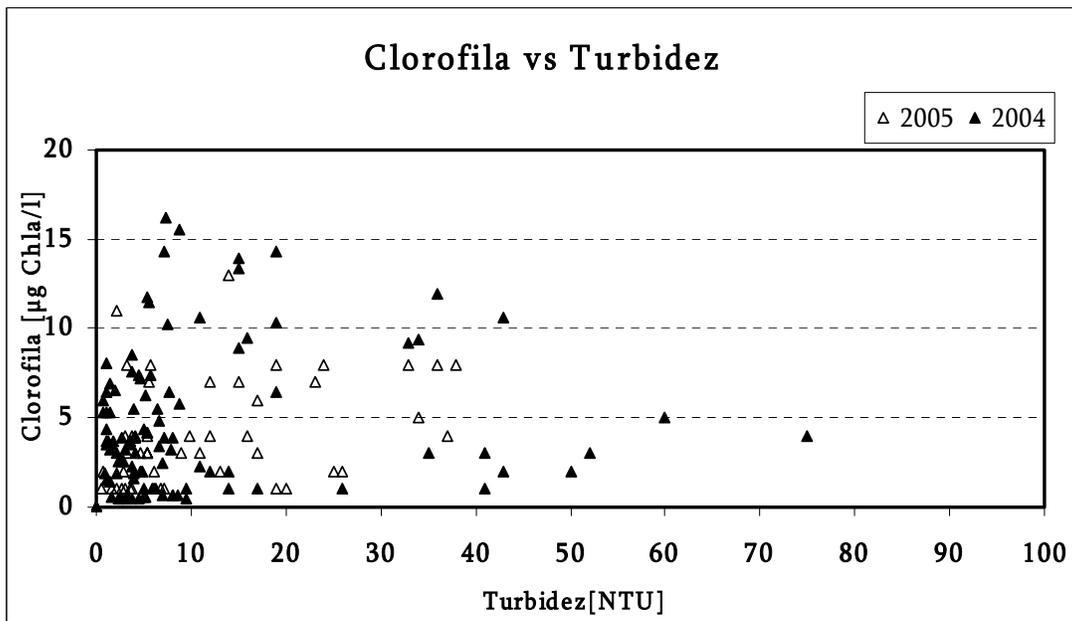


Figura 9. Resultados de Amostragem Clássica: Clorofila vs. Turbidez.

Pelo contrário, na Figura 10, que representa graficamente os valores de clorofila vs. amónia e clorofila vs. nitrato, não parece existir qualquer relação entre as propriedades. Estes resultados corroboram as hipóteses apresentadas na literatura que indicam a concentração de sedimentos como o factor mais importante de atenuação da luz na coluna de água no Estuário do Tejo, sendo a falta de disponibilidade de luz apontado como o principal factor limitante da produção primária no estuário. As figuras permitem ainda distinguir entre os dados referentes a 2004 e 2005 evidenciando que apesar da significativa diferença entre os valores de caudal apresentado pelo rio Tejo nos dois anos, não se detectam variações importantes na disposição dos dados, à excepção do gráfico Clorofila vs Nitrato que apresenta valores de Nitrato mais elevado em 2005 embora com clorofila na mesma ordem de grandeza.

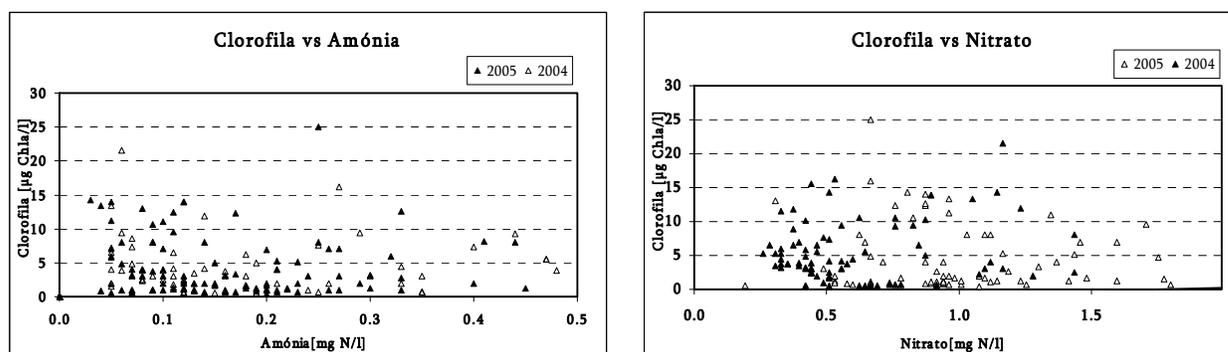


Figura 10. Resultados de Amostragem Clássica: Clorofila vs. Amónia e Clorofila vs. Nitrato.

## IV. Modelação Ambiental

### 1 MOHID Water Modelling System

Para assegurar a componente de modelação, foi utilizado o MOHID Water Modelling System como ferramenta de modelação numérica integrada (Braunschweig, *et al.*, 2004), capaz de simular todos os processos físicos e biogeoquímicos num sistema costeiro. Utilizando uma estratégia de programação orientada por objectos e todas as potencialidades do FORTRAN 95, o MOHID encontra-se organizado em módulos, ou classes, que se interligam de forma a determinar os resultados pretendidos.

Em traços gerais, é calculada a evolução de dois tipos de propriedades: as propriedades hidrodinâmicas, onde se incluem as velocidades, nível da água, fluxos de água e viscosidade turbulenta e as propriedades da água, tais como a salinidade, temperatura, densidade, nutrientes, matéria em suspensão, fitoplâncton, zooplâncton e, mais recentemente, as macroalgas bentónicas. Para o cálculo da evolução das propriedades ao longo do tempo e do espaço, o modelo baseia-se no conceito de volume finito, onde as equações são aplicadas macroscopicamente a cada volume de controlo, isto é a cada célula da malha, sob forma de um fluxo divergente, garantindo-se assim a conservação no transporte das propriedades.

O MOHID considera que o ecossistema que pretende simular é delimitado por fronteiras que podem corresponder a cinco diferentes situações: superfície livre, em contacto com a atmosfera; fundo, onde são considerados fenómenos como o atrito e erosão/deposição de sedimentos; fronteiras laterais abertas, onde são consideradas as trocas com outras massas de água; fronteiras laterais fechadas, que podem ser fixas ou móveis (estas últimas com posição variável no tempo, que correspondem às células que podem ficar a descoberto da água, dependendo da maré). Para o caso das fronteiras laterais fechadas, fixas ou móveis, considera-se que o fluxo existente é sempre nulo, sendo as trocas entre a terra e a água, como é o caso de um rio, consideradas como descargas.

O MOHID possui uma interface gráfica que simplifica a utilização do sistema. O seu funcionamento está dividido em três partes distintas: *Pre-processing*, relativo à aquisição e fornecimento dos dados; *Execution*, a execução dos cálculos propriamente dita e *Post-processing*, permitindo a exploração e interpretação dos resultados.

Os resultados do modelo podem ser visualizados em dois formatos distintos, dependendo do tipo de estudo que se pretende desenvolver: séries temporais de valores obtidos para determinadas células e resultados na

forma matricial, usando o Hierarchical Data Format (HDF), desenvolvido pelo National Center of Supercomputing Applications (NCSA).

Descrevem-se, de seguida, as características dos principais módulos do sistema MOHID utilizados na modelação ecológica do Estuário do Tejo, englobando uma descrição geral dos principais processos envolvidos. Descrições mais pormenorizadas sobre a estrutura, potencialidades e aplicações do sistema MOHID podem ser encontradas em *www.mohid.com*.

## 1.1. Hidrodinâmica

O Módulo Hidrodinâmico pode ser visto como o primeiro, na complexa cascata de modelos que compõem o sistema MOHID. Trata-se de um modelo hidrodinâmico tridimensional que resolve as equações de Navier-Stokes, considerando as aproximações de Boussinesq e Hidrostática. O modelo é formulado pelo método da aproximação por volumes finitos com uma discretização vertical genérica, que permite a implementação simultânea de vários tipos de coordenadas verticais.

As equações que representam a evolução da quantidade de movimento no sistema são:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_1)}{\partial x_j} = -f u_2 - g \frac{\rho_\eta}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x_1} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_s}{\partial x_1} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x_1} dx_3 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( A_j \frac{\partial u_1}{\partial x_j} \right)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_2)}{\partial x_j} = f u_1 - g \frac{\rho_\eta}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x_2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_s}{\partial x_2} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x_2} dx_3 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( A_j \frac{\partial u_2}{\partial x_j} \right)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g$$

Onde  $u_i$  representa as componentes do vector velocidade nas direcções cartesianas  $x_i$ ,  $\eta$  a superfície livre de elevação;  $f$  o parâmetro de Coriolis;  $A_j$  viscosidade turbulenta;  $p_s$  a pressão atmosférica;  $\rho$  a densidade e  $\rho'$  a sua variação. A densidade da água é calculada com base na equação de estado da UNESCO (UNESCO, 1981)

A maré surge como uma condição fronteira que, introduzida nas células correspondentes à fronteira marinha, alteram a elevação da superfície livre, propagando-se depois, através da equação da continuidade para as restantes células. O sistema permite ainda a utilização de um ficheiro hidrodinâmico, contendo a

informação do campo de velocidades calculado pelo modelo em simulações anteriores e que pode ser lido e repetido em simulações de longa duração, evitando o cálculo hidrodinâmico. Esta metodologia permite a redução significativa do tempo de cálculo para cada simulação.

## 1.2. Advecção-Difusão

Partindo do campo de velocidades e também dos coeficientes de difusão turbulenta, calculados pelo modelo hidrodinâmico, o modelo “transporta” as propriedades, incluindo a temperatura e salinidade, aplicando a equação de advecção-difusão para uma propriedade que se desloca no seio de um fluido em movimento.  $C$  corresponde à concentração da propriedade;  $u$ ,  $v$  e  $w$  representam as componentes da velocidade segundo os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente, e  $(F-P)$  representa os termos de fontes e poços da propriedade em cada uma das células de cálculo do modelo.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} v_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v_z \frac{\partial C}{\partial z} + (F - P)$$

## 1.3. Transporte de Sedimentos

Para o estudo da produção primária, a determinação da concentração de sedimentos em cada célula é fundamental, pois desta depende o factor de extinção da luz na água, que influencia a quantidade de luz disponível para a actividade fotossintética dos organismos.

A determinação da concentração de sedimentos presente em cada célula é conseguida através da aplicação da equação de advecção-difusão, onde a advecção vertical inclui a velocidade de sedimentação das partículas, dependente dos processos de floculação a que os sedimentos coesivos estão sujeitos. Neste modelo assume-se que, apesar do processo contínuo de formação/destruição dos flocos, dentro de cada volume de controlo, a distribuição dos sedimentos por tamanho permanece constante, não sendo necessária a adição de termos relativos à produção e decaimento, podendo assumir-se que os sedimentos suspensos se comportam de forma conservativa.

## 1.4. Efeito das Ondas

O vento gera tensões na interface água-atmosfera enrugando-a e produzindo ondas. As ondas, por sua vez, geram movimentos orbitais (rotacionais) cuja intensidade decai com a profundidade. Estes movimentos ao atingirem o fundo geram fricções produzindo tensões de corte (devidas às ondas). Estas tensões de corte

somadas às tensões de corte devidas às correntes, podem gerar tensões resultantes suficientes para ressuspender os sedimentos do fundo, influenciando assim a concentração de sedimentos na coluna de água.

Devido à forma do canal de entrada do Estuário do Tejo, as ondas do oceano ficam impedidas de entrar no estuário e as ondas existentes têm origem local (Freire, 1999). Ou seja, não existe propagação de ondas do exterior para o interior do estuário, que é uma das imposições do modelo. O modelo utilizado para contabilizar o efeito das ondas refere-se à geração de ondas por parte do vento e não é contemplada a propagação (difracção, refracção, etc.) dentro da zona de estudo, utilizando o conceito de Fetch (Brito, 2005). O Fetch é o comprimento de acção do vento e num determinado ponto pode ser visto como o comprimento da linha imaginária à superfície da água (na direcção do vento), que vai desde a zona onde se começa a fazer sentir o vento até esse ponto. A direcção do vento é assim utilizada para calcular o comprimento de acção do vento ou Fetch. Para cada instante, cada célula da malha apresenta a onda gerada em termos de altura de onda (em metros) e período da onda (em segundos). Estes dois componentes são depois utilizados pelo MOHID para calcular a velocidade orbital no fundo e a consequente tensão de corte devida às ondas.

## 1.5. Qualidade da Água

O modelo de qualidade da água, considerado como o topo do sistema, permite calcular o termo relativo às fontes e poços, específicos para cada propriedade fundamental, em cada uma das células da malha e em cada instante.

As fontes e poços associados a cada propriedade dependem dos processos químicos e biológicos em que está envolvida e encontram-se associados aos ciclos biogeoquímicos do Azoto e Fósforo e indirectamente do Carbono e Oxigénio. O cálculo da evolução das propriedades de qualidade da água é feito com recurso a um módulo específico – Modulo Water Quality.

Executar o módulo de qualidade da água implica executar os modelos precedentes: em cada instante, o modelo hidrodinâmico simula as elevações da superfície livre e as velocidades do fluido (água) necessárias ao cálculo dos termos de advecção-difusão; conjugando o transporte com as reacções químicas e biológicas na coluna de água, simuladas neste módulo, obtém-se, na mesma malha de cálculo, a distribuição espacial dos parâmetros de qualidade da água. O Modulo Water Quality do modelo encontra-se preparado para fornecer, em cada célula da malha, o valor da concentração de azoto (nas formas de amónia, nitrato, nitrito, azoto orgânico dissolvido refractário, DONr, não refractário, DONnr, e azoto orgânico particulado, PON), fósforo orgânico e inorgânico, oxigénio dissolvido e ainda fitoplâncton, zooplâncton e macroalgas.

A formulação matemática utilizada na descrição dos processos relacionados com os produtores primários encontra-se descrita, com maior pormenor, no Anexo I deste relatório, bem como os principais parâmetros e pressupostos considerados.

## 2 Implementação do modelo

São descritas nesta secção as especificidades da implementação do modelo ao Estuário do Tejo, incluindo a descrição dos domínios considerados e das condições de fronteira utilizadas.

### 2.1 Sistema de Modelos Encaixados

No sentido de minimizar eventuais erros associados às condições de fronteira, o modelo MOHID permite a utilização de modelos encaixados através de uma metodologia de “downscaling” da solução que permite o estabelecimento de condições fronteira para aplicações locais de pequena escala. O presente estudo utiliza esta mesma filosofia considerando 2 níveis de simulação. O primeiro nível cobre a costa da Península Ibérica (Figura 11), sendo constituído por 218x324 células de cálculo, com um passo espacial constante de  $0.02^\circ$  ( $\sim 2.5$  km). Utiliza um forçamento dado pela solução global de maré e vento. Trata-se de uma aplicação bidimensional que permite estabelecer condições de fronteira de oceano aberto mais realistas para um segundo nível de aplicação – o Estuário do Tejo. A Figura 12 e a Figura 13 representam respectivamente a batimetria e a malha utilizada (ampliada apenas para a região interior do Estuário do Tejo) no segundo nível de aplicação. Este domínio é composto por 162x162 células de cálculo, com um passo espacial variável entre  $0.02^\circ$  ( $\sim 2.5$ km) na fronteira aberta e  $0.003^\circ$  ( $\sim 300$ m) no interior de estuário. Neste segundo nível encontra-se implementada uma aplicação bidimensional que permite o cálculo da evolução das propriedades de qualidade da água ao longo do tempo. A opção de utilizar uma aplicação bidimensional para o cálculo das propriedades de qualidade da água prende-se essencialmente com exigências em termos de tempo de cálculo que uma simulação tridimensional de um grande número de propriedades ao longo de uma ano implicaria. No entanto, sendo o Estuário do Tejo considerado como um estuário pouco estratificado ou parcialmente estratificado é possível considerar que os gradientes verticais existentes não são significativos em situações típicas e à escala global do estuário, sendo desta forma suficiente, para o estudo em causa, uma aplicação bidimensional.

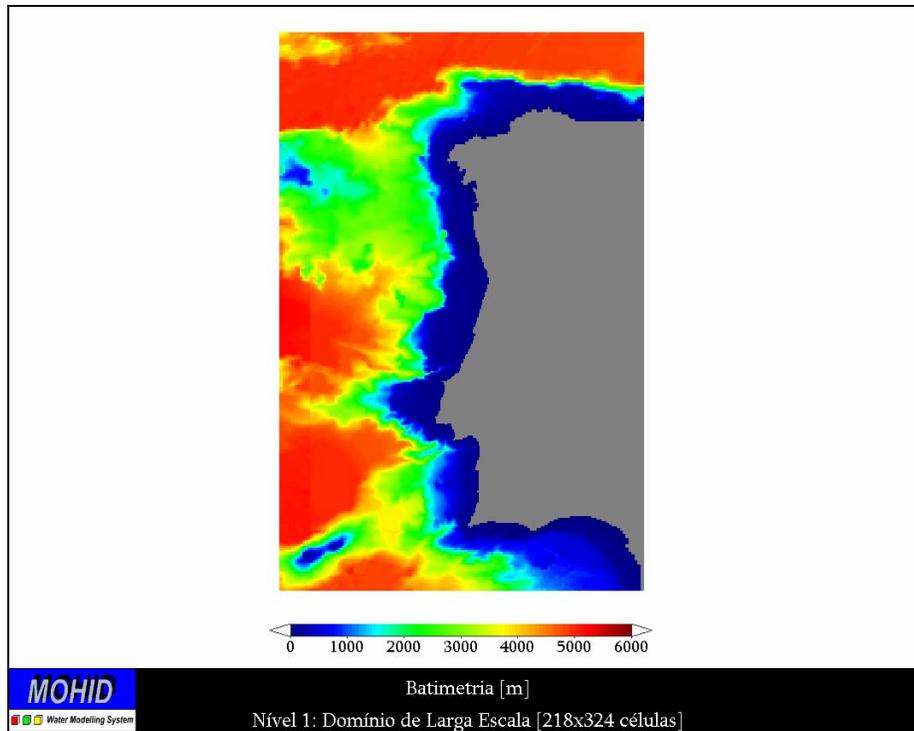


Figura 11. Batimetria da aplicação de larga escala (Nível 1).

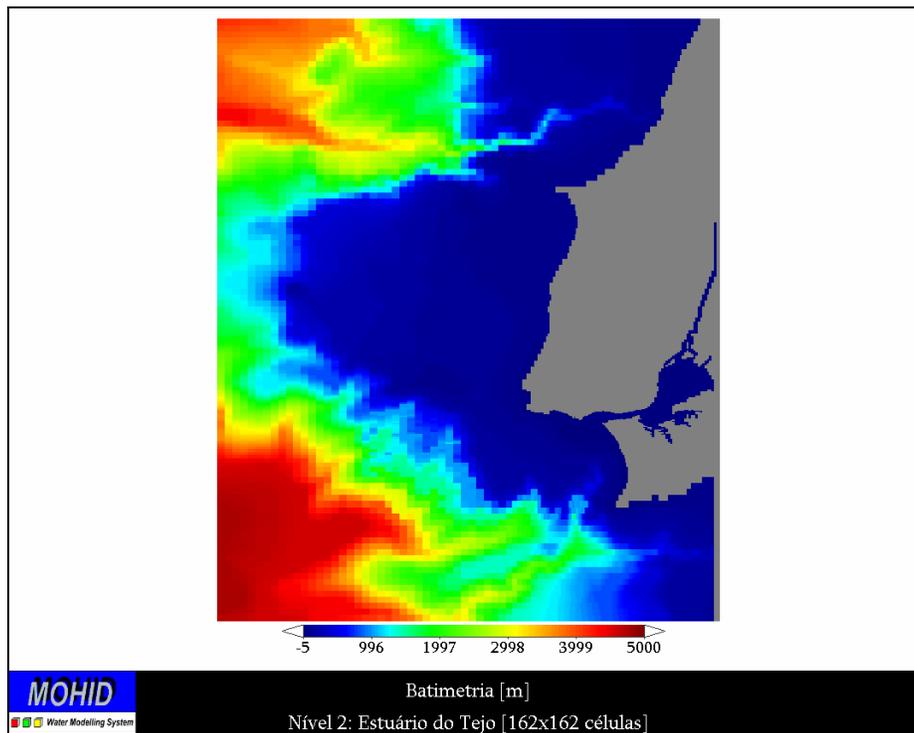


Figura 12. Batimetria utilizada na aplicação do Estuário do Tejo (Nível 2).

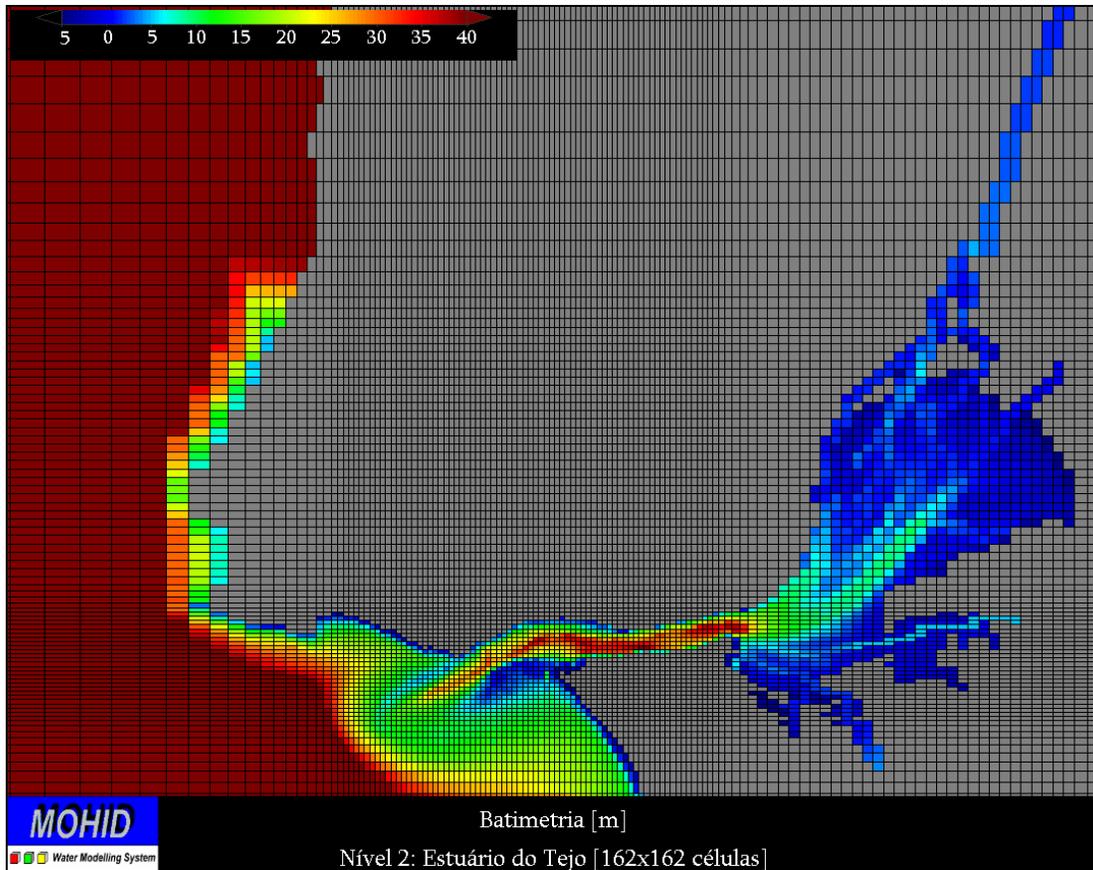


Figura 13. Malha utilizada na aplicação do Estuário do Tejo, Nível 2 (ampliação da região interior do estuário).

## 2.2 Condições Fronteira

### 2.2.1 Atmosfera

Processos como o efeito das ondas na concentração de sedimentos ou a temperatura da água dependem em grande medida das condições existentes na atmosfera, pelo que a sua caracterização deverá ser tão real quanto possível. O forçamento atmosférico utilizado na modelação do Estuário do Tejo aqui apresentada recorre às previsões de vento, temperatura, radiação, humidade relativa e fluxos de calor à superfície calculadas por uma aplicação operacional do modelo meteorológico MM5. O modelo em questão é considerado um modelo de mesoscala, não hidrostático, com um sistema de coordenadas que segue a topografia, resolvendo as equações de Navier-Stokes em três dimensões, a equação termodinâmica e a equação de conservação da água. A sua aplicação operacional para a costa portuguesa é desenvolvida e mantida no Instituto Superior Técnico sob coordenação do Prof. Delgado Domingos, e os seus resultados podem ser consultados em <http://meteo.ist.utl.pt>. A malha de cálculo da aplicação operacional possui um

espaçamento de cerca de 9 km o que, comparado com a dimensão do Estuário do Tejo, é um valor bastante elevado. Desta forma, consideram-se apenas as previsões meteorológicas para um dado ponto no estuário (Figura 14), não sendo considerada variabilidade espacial das propriedades atmosféricas neste estudo. A variabilidade temporal das propriedades é no entanto assegurada através da utilização de uma série temporal dos valores calculados pelo modelo MM5.

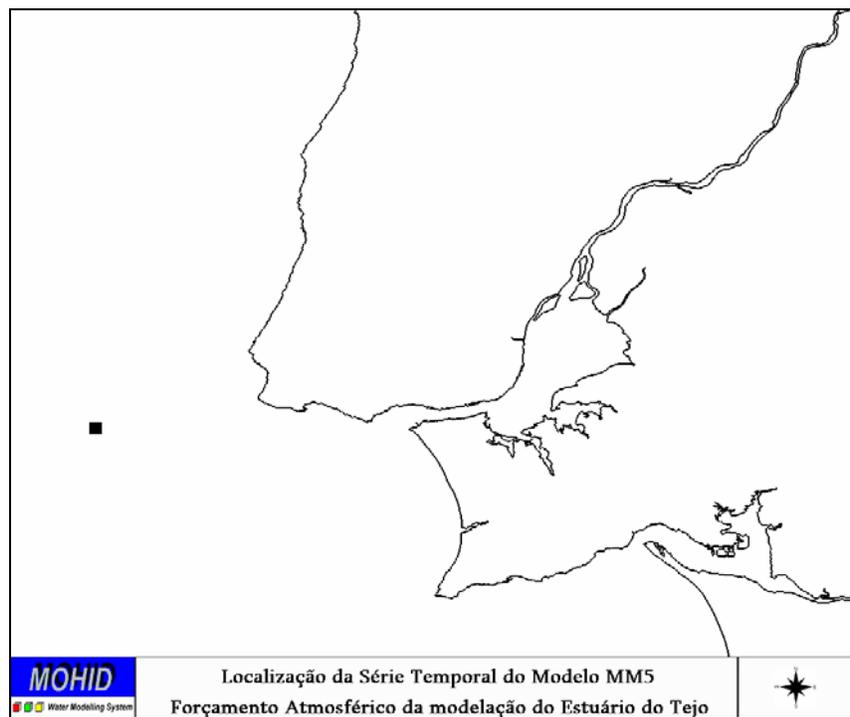


Figura 14. Localização da Série Temporal de Valores do modelo MM5 utilizada como forçamento atmosférico na modelação ambiental do Estuário do Tejo.

## 2.2.2 Oceano

O efeito de maré é de extrema importância no Estuário do Tejo, apresentando um regime semi-diurno dominado pela vazante. A amplitude média de maré é cerca de 2m, com um valor mínimo de cerca de 1m. Em situação de amplitude máxima, durante a baixa-mar, cerca de 40% da superfície do estuário fica emersa, o que corresponde aproximadamente a uma área de 110 km<sup>2</sup>.

Como descrito anteriormente, o esquema de modelos encaixados permite que a condição de fronteira, para o cálculo dos processos físicos no estuário do Tejo, seja o resultado de uma aplicação do modelo a um domínio mais abrangente, cujas condições fronteira são baseadas num modelo global de maré.

A Tabela 1 apresenta as características da fronteira marítima, em termos de propriedades da água, impostos no Nível 2 da aplicação do modelo (domínio correspondente à zona do Estuário do Tejo, Figura 12).

Considera-se que existe no mar uma variação sazonal pouco significativa, pelo que se consideram neste estudo, valores constantes das propriedades ao longo do ano.

**Tabela 1.** Características da fronteira marítima.

Salinidade	36
Temperatura [°C]	16
Amónia [mgN/l]	0,002
Nitrato [mgN/l]	0,02
Nitrito [mgN/l]	0,01
DONr [mgN/l]	0,001
DONnr [mgN/l]	0,002
PON [mgN/l]	0,0009
Fitoplâncton [mgC/l]	0,03
Zooplâncton [mgC/l]	0,003
Matéria em Suspensão [mg/l]	0,1
Oxigénio Dissolvido [mgO <sub>2</sub> /l]	8
DOPr [mgP/l]	0,001
DONnr [mgP/l]	0,001
Fósforo Inorgânico [mgP/l]	0,001
POP [mgP/l]	0,001

### 2.2.3 Descargas

Sendo as fronteiras, à excepção do mar, consideradas como fechadas, todas as trocas existentes entre a terra e o Estuário do Tejo são assumidas como descargas em determinadas células da malha. Localizando-se as descargas em pontos próximos de terra é possível que durante a maré vazia, algumas das células consideradas fiquem a descoberto. Nestes casos, a descarga é feita na célula de cálculo coberta mais próxima, sendo assim variável ao longo do tempo. A Figura 15 representa a localização dos principais rios afluentes ao Estuário do Tejo – Tejo, Sorraia e Trancão – e as ETAR consideradas neste estudo, cujos efluentes são descarregados no estuário. As características consideradas para cada uma destas descargas serão descritas nas secções seguintes.

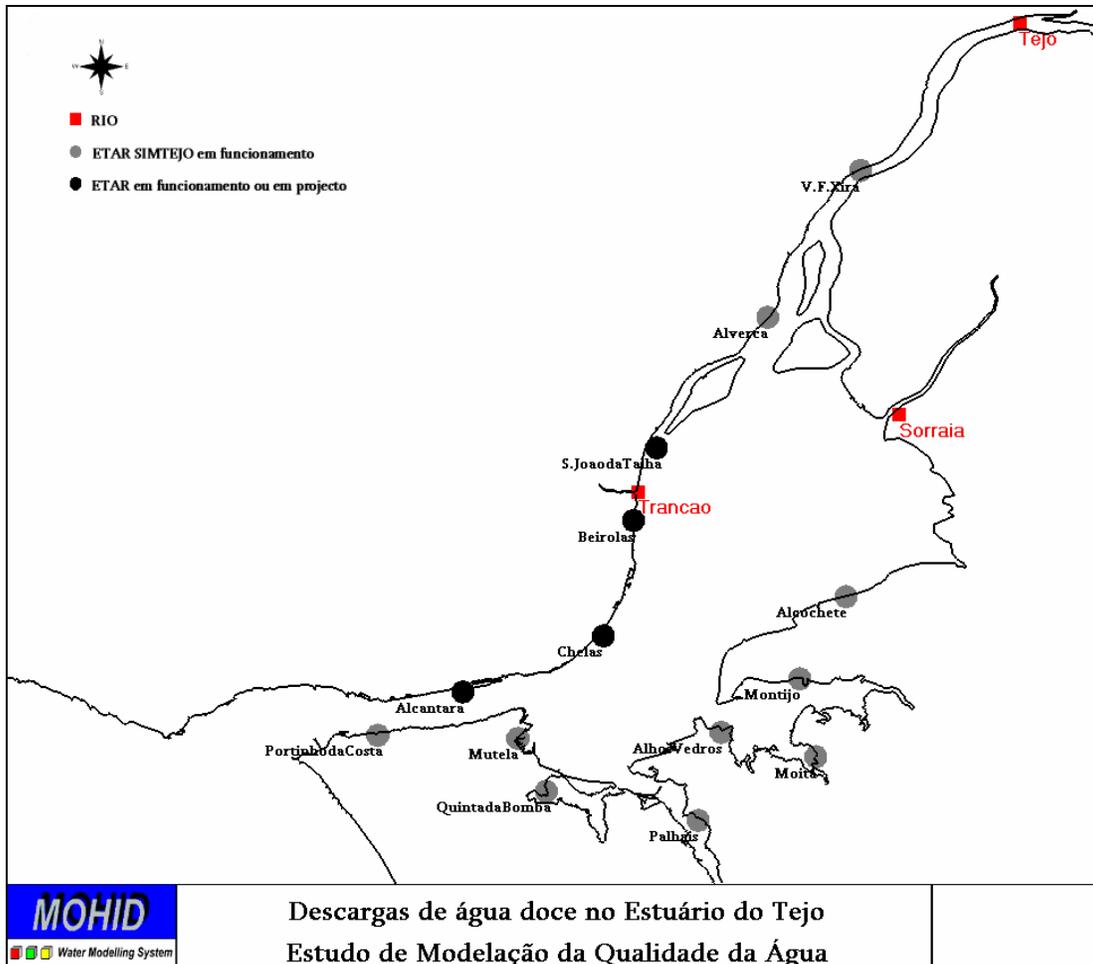


Figura 15. Localização das descargas de água doce consideradas na modelação ecológica.

### 2.2.3.1 Rios Afluentes

Ao contrário do mar, onde as variabilidades sazonais das propriedades e dos níveis de água são relativamente bem conhecidas e relativamente baixas, nos rios essa variabilidade depende de inúmeros factores, o que torna, em certa medida, difícil identificar uma variação sazonal característica. De uma maneira geral, a variabilidade das descargas é significativa, não só ao longo de um ano, mas também ao longo de anos diferentes, dependendo das condições climáticas que se fazem sentir e ainda do tipo de ocupação do solo na área de drenagem associada. Como referido anteriormente, o presente estudo tem como referência o ano de 2005, pelo que as características de descarga impostas na simulação deverão representar o ano de 2005 da forma mais aproximada possível. A caracterização é feita com base nos registos de campanhas de amostragem realizadas no âmbito do projecto de monitorização da SIMTEJO e recorrendo aos registos das estações da rede de amostragem do INAG, tentando utilizar o maior número de dados válidos disponíveis.

A caracterização de cada uma das descargas é feita em termos de caudal afluente ao Estuário do Tejo e de concentração de algumas propriedades da água relevantes para o estudo, nomeadamente nutrientes (formas de azoto e fósforo), matéria em suspensão, temperatura e ainda oxigénio dissolvido.

Em termos de caudal, a caracterização das descargas do Rio Tejo e Rio Sorraia recorre aos registos existente na estação de Tramagal (Figura 16).



Figura 16. Localização das estações de amostragem do INAG utilizadas para a caracterização do Rio Tejo, Rio Sorraia e Rio Trancão.

No caso do Rio Tejo, a opção de escolha desta estação em detrimento da estação de Ómnias-Santarém (estação utilizada em estudos anteriores: INAG/MARETEC, 2002; Saraiva, 2001; Saraiva *et al.*) prende-se com o facto de ter sido detectada uma inconsistência nos seus registos durante o ano de 2005, que resultam de uma falha nos instrumentos de medição. A estação de Tramagal, em funcionamento desde 1990, tem-se mantido estável e com poucas falhas, possuindo assim uma série de registos que podem ser correlacionados com os registos da estação de Ómnias-Santarém em anos anteriores. Partindo desta relação entre os caudais medidos nas duas estações e nos registos de Tramagal para o ano de 2005 é possível extrapolar os valores junto a Ómnias-Santarém, onde se considera existirem as características da descarga do Rio Tejo. No caso do Rio Sorraia foi utilizado o mesmo tipo de metodologia, relacionando agora os registos das estações de Tramagal e Ponte de Coruche (Figura 16). A Figura 17 representa a série temporal de valores de caudal do Rio Tejo e Rio Sorraia considerados na simulação do ano de 2005.

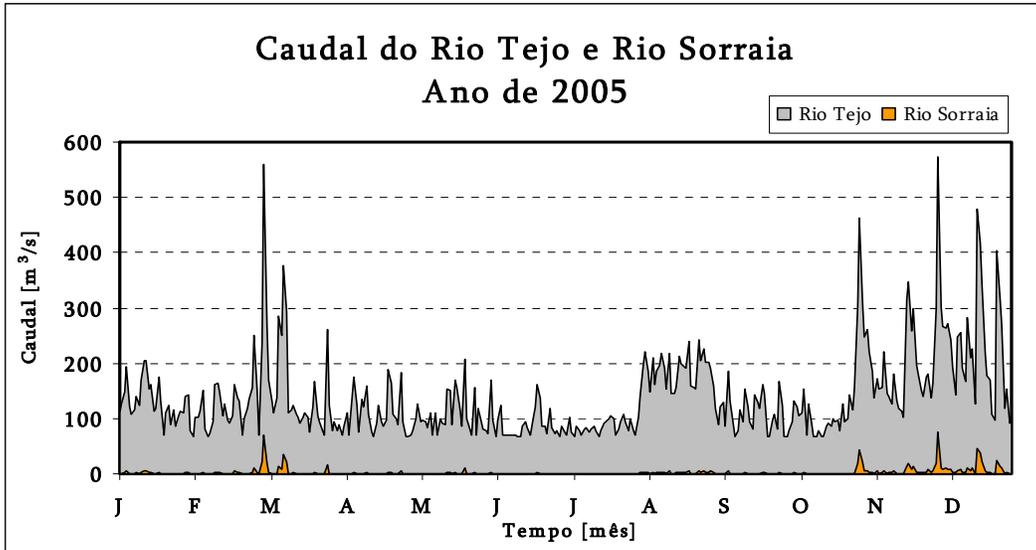


Figura 17. Série Temporal de Caudal do Rio Tejo e Rio Sorraia no ano de 2005.

Para a caracterização do caudal do Rio Trancão são utilizados os registos da estação de Ponte de Sacavém, também representada na Figura 16. Porque o número de registos é substancialmente menor que nas estações anteriores, considera-se um valor médio mensal de caudal, característico de um ano médio (Figura 18).

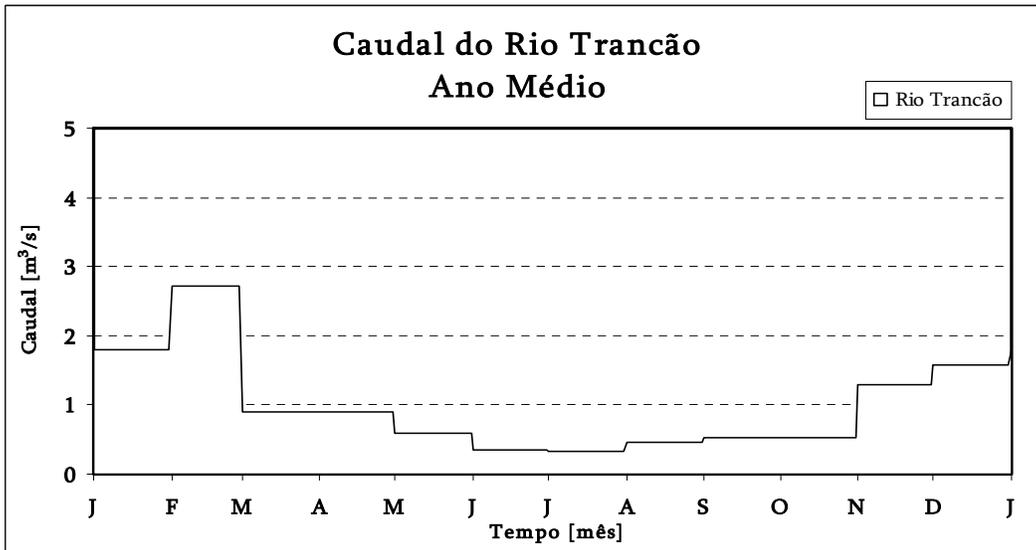


Figura 18. Série Temporal de caudal do Rio Trancão no ano de 2005.

Relativamente às propriedades da água consideram-se para cada uma das descargas os valores resultantes das amostragens clássicas realizadas no âmbito do programa de monitorização da SIMTEJO, que decorrem mensalmente desde 2004, apesar da existência de algumas falhas. O programa inclui a amostragem de

algumas propriedades relevantes no estudo, em três estações localizadas junto à descarga de cada um dos rios em causa (Figura 19).

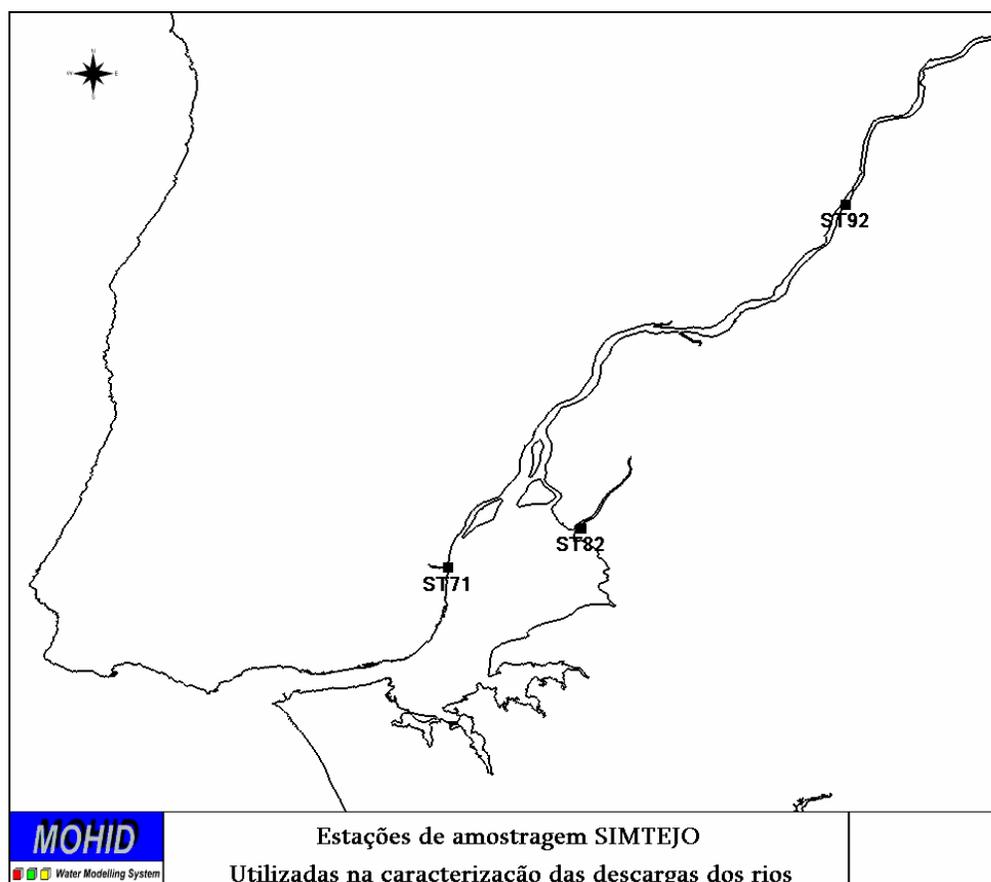


Figura 19. Estações de amostragem SIMTEJO utilizadas na caracterização do Rio Tejo (ST92), Rio Sorraia (ST82) e Rio Trancão (ST71).

Para todas as propriedades do modelo foram utilizados os dados de campo recolhidos nas respectivas três estações directamente ou recorrendo a relações típicas entre propriedades, à excepção da concentração de sedimentos imposta na descarga do Rio Tejo. O modelo utilizado não simula de forma eficiente o aumento de matéria em suspensão na região de montante do estuário devido ao processo de floculação que ocorre devido à mistura entre a água doce e salina. Assim em termos práticos os processos que ocorrem entre o início do estuário a montante e a região da Cala do Norte (zona de máxima turbidez) não estão assegurados no modelo. De forma a minimizar esta falha, optou-se por considerar como descarga do Rio Tejo os valores medidos junto da Cala do Norte (estação ST84, do programa de monitorização). A Figura 20 apresenta as séries temporais impostas nas descargas dos rios afluentes, para as propriedades Nitrato, Amónia, Fósforo Total e ainda Sólidos Suspensos Totais.

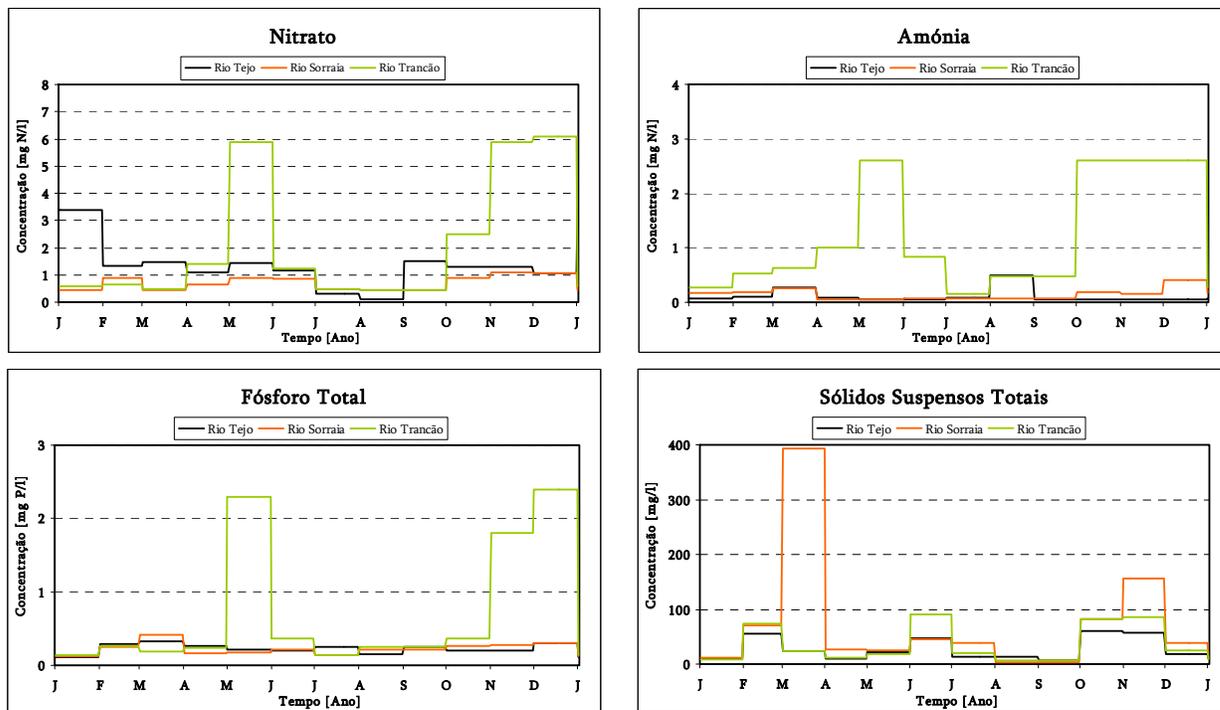


Figura 20. Série temporal de valores impostos para as descargas dos principais rios afluentes: Nitrato, Amónia, Fósforo Total e Sólidos Suspensos Totais.

### 2.2.3.2 Águas Residuais Urbanas

A caracterização das descargas das ETAR consideradas no estudo resulta de diversas fontes de informação: (i) dados reais, obtidos através de tratamento dos valores obtidos por consulta de relatórios de funcionamento das estações, como é o caso das estações de tratamento pertencentes à SIMTEJO, onde são realizadas mensalmente amostragens ao efluente à saída da estação; (ii) valores determinados tendo em conta dados de população equivalente disponíveis (reais ou de projecto), valores típicos tabelados para as condições de efluente à entrada e percentagens de remoção típicas consoante o tipo de tratamento efectuado (Tabela 2 e Tabela 3). Os valores de descarga considerados no modelo, para as ETAR da SIMTEJO em funcionamento possuem uma variação mensal das propriedades, enquanto que para as restantes ETAR foi considerado um valor médio anual, de acordo com o tipo de dados disponíveis.

Tabela 2. Valores Típicos de propriedades nos efluentes das ETAR (Metcalf and Eddy, 1991).

Propriedades		Valor Típico
Caudal		200 l/eq
Sólidos Suspensos Totais		90.7 g/eq
Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO <sub>5</sub> )		60 g/eq
Azoto Inorgânico	Nitrito	10 mg N / L
	Nitrato	15 mg N / L
Ammonia		3.2 gN/eq
Azoto Orgânico		9.1 gN/eq
Dissolvido	Azoto Orgânico Dissolvido Não-Refrectário	35% Azoto Orgânico Total
	Azoto Orgânico Dissolvido Refractário	15% Azoto Orgânico Total
Particulado		50% Azoto Orgânico Total

Tabela 3. Valores Típicos de eficiência de remoção das propriedades em ETAR (Metcalf and Eddy, 1991).

Propriedades	Tratamento Primário	Tratamento Secundário	Tratamento Secundário com Remoção de Nutrientes
Sólidos Suspensos Totais	50%	85%	85%
Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO <sub>5</sub> )	20%	90%	90%
Azoto Inorgânico	Nitrito	0%	100%
	Nitrato	0%	85%
Ammonia	0%	10%	10%
Azoto Orgânico	10%	30%	30%
Dissolvido	Azoto Orgânico Dissolvido Não-Refrectário	3%	15%
	Azoto Orgânico Dissolvido Refractário	3%	100%
Particulado	4%	15%	15%

As tabelas seguintes (Tabela 4 a Tabela 7) apresentam os valores impostos nas ETAR da SIMTEJO e a Tabela 8 corresponde às características médias das restantes ETAR, consideradas neste estudo.

Tabela 4. Características do efluente actual da ETAR de Alcântara.

	ALCANTARA													
	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Temperatura [°C]	Amónia [mgN/l]	Nitrato [mgN/l]	Nitrito [mgN/l]	DONr [mgN/l]	DONnr [mgN/l]	PON [mgN/l]	SST [mg/l]	Oxigénio Dissolvido [mg/l]	DOPr [mgP/l]	DOPnr [mgP/l]	Fósforo Inorgânico [mgP/l]	POP [mgP/l]
Janeiro	0.94	17.40	11.71	18.87	0.001	5.17	12.07	17.24	98.00	7.00	0.18	0.45	2.10	0.27
Fevereiro	0.81	16.80	8.06	12.99	0.001	3.56	8.31	11.87	75.00	7.00	0.16	0.41	1.89	0.24
Março	0.87	17.80	11.81	19.03	0.001	5.22	12.18	17.39	86.00	7.00	0.26	0.66	3.08	0.40
Abril	0.89	19.00	12.04	19.40	0.001	5.32	12.41	17.73	85.00	7.00	0.19	0.48	2.24	0.29
Mai	1.07	18.40	11.46	18.46	0.001	5.06	11.81	16.87	95.00	7.00	0.25	0.62	2.87	0.37
Junho	1.12	18.98	9.41	15.15	0.001	4.15	9.69	13.85	110.00	7.00	0.23	0.59	2.73	0.35
Julho	1.08	18.98	10.75	17.32	0.001	4.75	11.08	15.83	86.96	7.00	0.21	0.53	2.49	0.32
Agosto	1.07	22.00	10.75	17.32	0.001	4.75	11.08	15.83	78.00	7.00	0.21	0.53	2.49	0.32
Setembro	1.19	22.50	10.75	17.32	0.001	4.75	11.08	15.83	78.22	7.00	0.21	0.53	2.49	0.32
Outubro	1.26	21.40	10.75	17.32	0.001	4.75	11.08	15.83	73.29	7.00	0.21	0.53	2.49	0.32
Novembro	1.34	19.50	10.75	17.32	0.001	4.75	11.08	15.83	90.13	7.00	0.21	0.53	2.49	0.32
Dezembro	0.60	18.00	10.75	17.32	0.001	4.75	11.08	15.83	87.89	7.00	0.21	0.53	2.49	0.32

Tabela 5. Características do efluente actual da ETAR de Beirolas.

	BEIROLAS													
	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Temperatura [°C]	Amónia [mgN/l]	Nitrato [mgN/l]	Nitrito [mgN/l]	DONr [mgN/l]	DONnr [mgN/l]	PON [mgN/l]	SST [mg/l]	Oxigénio Dissolvido [mg/l]	DOPr [mgP/l]	DOPnr [mgP/l]	Fósforo Inorgânico [mgP/l]	POP [mgP/l]
Janeiro	0.51	17.40	23.68	1.60	0.001	0.47	1.10	1.58	14.00	7.00	0.20	0.50	2.31	0.30
Fevereiro	0.46	16.80	5.63	4.83	0.001	0.32	0.74	1.05	6.50	7.00	0.16	0.41	1.89	0.24
Março	0.49	17.80	11.85	2.70	0.001	0.17	0.40	0.58	9.17	7.00	0.19	0.48	2.24	0.29
Abril	0.45	19.00	3.00	3.25	0.001	0.29	0.67	0.95	7.50	7.00	0.22	0.54	2.52	0.32
Mai	0.37	18.40	15.90	1.95	0.001	0.59	1.37	1.95	8.63	7.00	0.12	0.30	1.40	0.18
Junho	0.41	18.40	15.90	1.95	0.001	5.87	13.69	19.55	10.00	7.00	0.28	0.71	3.29	0.42
Julho	0.37	18.40	15.90	1.95	0.001	5.87	13.69	19.55	10.00	7.00	0.28	0.71	3.29	0.42
Agosto	0.31	22.00	14.90	1.15	0.001	0.32	0.74	1.05	5.88	7.00	0.10	0.24	1.12	0.14
Setembro	0.39	22.50	18.95	1.00	0.001	0.40	0.93	1.33	6.29	7.00	0.18	0.45	2.10	0.27
Outubro	0.50	21.40	23.20	1.00	0.001	0.59	1.38	1.98	19.88	7.00	0.16	0.39	1.82	0.23
Novembro	0.47	19.50	29.30	2.10	0.001	1.76	4.10	5.85	11.50	7.00	0.17	0.44	2.03	0.26
Dezembro	0.45	18.00	20.20	2.35	0.001	0.37	0.86	1.23	15.40	7.00	0.14	0.35	1.61	0.21

**Tabela 6. Características do efluente actual da ETAR de Chelas.**

	CHELAS													
	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Temperatura [°C]	Amónia [mgN/l]	Nitrato [mgN/l]	Nitrito [mgN/l]	DONr [mgN/l]	DONnr [mgN/l]	PON [mgN/l]	SST [mg/l]	Oxigénio Dissolvido [mg/l]	DOPr [mgP/l]	DOPnr [mgP/l]	Fósforo Inorgânico [mgP/l]	POP [mgP/l]
Janeiro	0.38	20.00	1.08	1.74	0.001	1.27	2.96	4.23	33.00	7.00	0.12	0.30	1.40	0.18
Fevereiro	0.40	19.17	1.31	2.12	0.001	1.54	3.60	5.14	19.00	7.00	0.24	0.60	2.80	0.36
Março	0.40	18.00	1.58	2.55	0.001	1.86	4.34	6.20	3.00	7.00	0.23	0.59	2.73	0.35
Abril	0.38	19.75	1.33	2.15	0.001	1.56	3.65	5.21	10.00	7.00	0.25	0.62	2.87	0.37
Mai	0.38	22.20	1.57	2.52	0.001	1.84	4.29	6.13	10.00	7.00	0.19	0.48	2.24	0.29
Junho	0.33	23.36	1.67	2.70	0.001	1.96	4.58	6.55	21.00	7.00	0.12	0.30	1.40	0.18
Julho	0.42	20.97	2.98	2.48	0.001	1.22	2.84	4.05	18.34	7.00	0.19	0.48	2.23	0.29
Agosto	0.41	22.93	3.20	3.30	0.001	0.44	1.02	1.45	8.92	7.00	0.18	0.45	2.10	0.27
Setembro	0.39	24.25	9.10	2.95	0.001	0.58	1.35	1.93	18.27	7.00	0.20	0.50	2.31	0.30
Outubro	0.40	23.00	3.80	2.45	0.001	0.77	1.80	2.58	16.60	7.00	0.19	0.48	2.24	0.29
Novembro	0.41	21.33	9.20	2.50	0.001	0.29	0.67	0.95	21.23	7.00	0.25	0.63	2.94	0.38
Dezembro	0.42	19.67	1.00	3.90	0.001	0.44	1.03	1.48	16.60	7.00	0.19	0.47	2.17	0.28

**Tabela 7. Características do efluente actual da ETAR de S. João da Talha.**

	S. JOÃO DA TALHA													
	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Temperatura [°C]	Amónia [mgN/l]	Nitrato [mgN/l]	Nitrito [mgN/l]	DONr [mgN/l]	DONnr [mgN/l]	PON [mgN/l]	SST [mg/l]	Oxigénio Dissolvido [mg/l]	DOPr [mgP/l]	DOPnr [mgP/l]	Fósforo Inorgânico [mgP/l]	POP [mgP/l]
Janeiro	0.14	17.40	8.11	1.64	0.001	9.52	22.21	31.73	162.42	7.00	0.33	0.83	3.85	0.50
Fevereiro	0.14	16.80	7.68	1.64	0.001	9.01	21.02	30.04	171.00	7.00	0.32	0.81	3.78	0.49
Março	0.15	17.80	8.27	1.64	0.001	9.71	22.65	32.36	163.85	7.00	0.56	1.41	6.58	0.85
Abril	0.14	19.00	7.50	1.64	0.001	8.80	20.53	29.33	178.77	7.00	0.17	0.42	1.96	0.25
Mai	0.14	18.40	6.50	1.64	0.001	7.63	17.80	25.42	94.31	7.00	0.18	0.45	2.10	0.27
Junho	0.14	19.28	3.89	1.64	0.001	4.56	10.65	15.21	40.92	7.00	0.32	0.81	3.78	0.49
Julho	0.13	19.28	12.29	1.64	0.001	5.93	13.84	19.77	122.87	7.00	0.29	0.72	3.35	0.43
Agosto	0.12	22.00	17.83	1.00	0.001	3.27	7.62	10.88	154.36	7.00	0.41	1.04	4.83	0.62
Setembro	0.13	22.50	19.10	1.60	0.001	1.46	3.40	4.85	87.85	7.00	0.20	0.50	2.31	0.30
Outubro	0.16	21.40	20.20	2.30	0.001	3.26	7.60	10.85	116.30	7.00	0.30	0.75	3.50	0.45
Novembro	0.15	19.50	23.50	1.00	0.001	3.33	7.77	11.10	110.85	7.00	0.19	0.47	2.17	0.28
Dezembro	0.15	18.00	16.85	2.30	0.001	1.11	2.59	3.70	31.36	7.00	0.13	0.33	1.54	0.20

**Tabela 8. Características do efluente actual das restantes ETAR consideradas.**

	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Temperatura [°C]	Amónia [mgN/l]	Nitrato [mgN/l]	Nitrito [mgN/l]	DONr [mgN/l]	DONnr [mgN/l]	PON [mgN/l]	SST [mg/l]	Oxigénio Dissolvido [mg/l]	DOPr [mgP/l]	DOPnr [mgP/l]	Fósforo Inorgânico [mgP/l]	POP [mgP/l]
Mutela	0.34	19.72	14.40	14.94	9.96	6.62	15.45	21.84	226.75	7.00	1.22	3.04	11.35	1.82
Portinho da Costa	0.32	19.72	14.40	14.94	9.96	6.62	15.45	21.84	226.75	7.00	1.22	3.04	11.35	1.82
Quinta da Bomba	0.64	19.72	14.40	6.47	0.00	5.80	0.00	19.34	68.03	7.00	0.66	1.66	4.89	0.99
Alhos Vedros	0.01	19.72	14.40	6.47	0.00	5.80	0.00	19.34	68.03	7.00	0.66	1.66	4.89	0.99
Moita	0.18	19.72	14.40	14.94	9.96	6.62	15.45	21.84	226.75	7.00	1.22	3.04	11.35	1.82
Palhais	0.79	19.72	14.40	2.24	0.00	5.80	0.00	19.34	68.03	7.00	0.66	1.66	4.89	0.99
Montijo	0.14	19.72	14.40	14.94	9.96	6.62	15.45	21.84	226.75	7.00	1.22	3.04	11.35	1.82
Alcochete	0.02	19.72	14.40	2.24	0.00	5.80	0.00	19.34	68.03	7.00	0.66	1.66	4.89	0.99
Vila Franca de Xira*	0.14	19.72	14.40	14.94	9.96	6.62	15.45	21.84	226.75	7.00	1.22	3.04	11.35	1.82
Alverca*	0.49	19.72	14.40	14.94	9.96	6.62	15.45	21.84	226.75	7.00	1.22	3.04	11.35	1.82

\*Valores de projecto

### 2.2.3.3 Input Total de Nutrientes: quantificação relativa

A Figura 21 representa as contribuições relativas das diversas descargas existentes no Estuário do Tejo, em termos de *input* total de água doce, fósforo inorgânico, nitrato e amónia. A principal fonte de água doce é o rio Tejo, com uma contribuição de cerca de 94%, destacando-se também a sua contribuição em termos de *input* total de nitrato (76%). As principais fontes de nitrato encontram-se assim associadas ao caudal do rio Tejo, possivelmente como resultado da lixiviação dos campos, em particular dos sistemas agrícolas existentes na bacia hidrográfica. Relativamente ao *input* de amónia e fósforo inorgânico verifica-se uma significativa contribuição das ETAR, com 77% e 56% respectivamente.

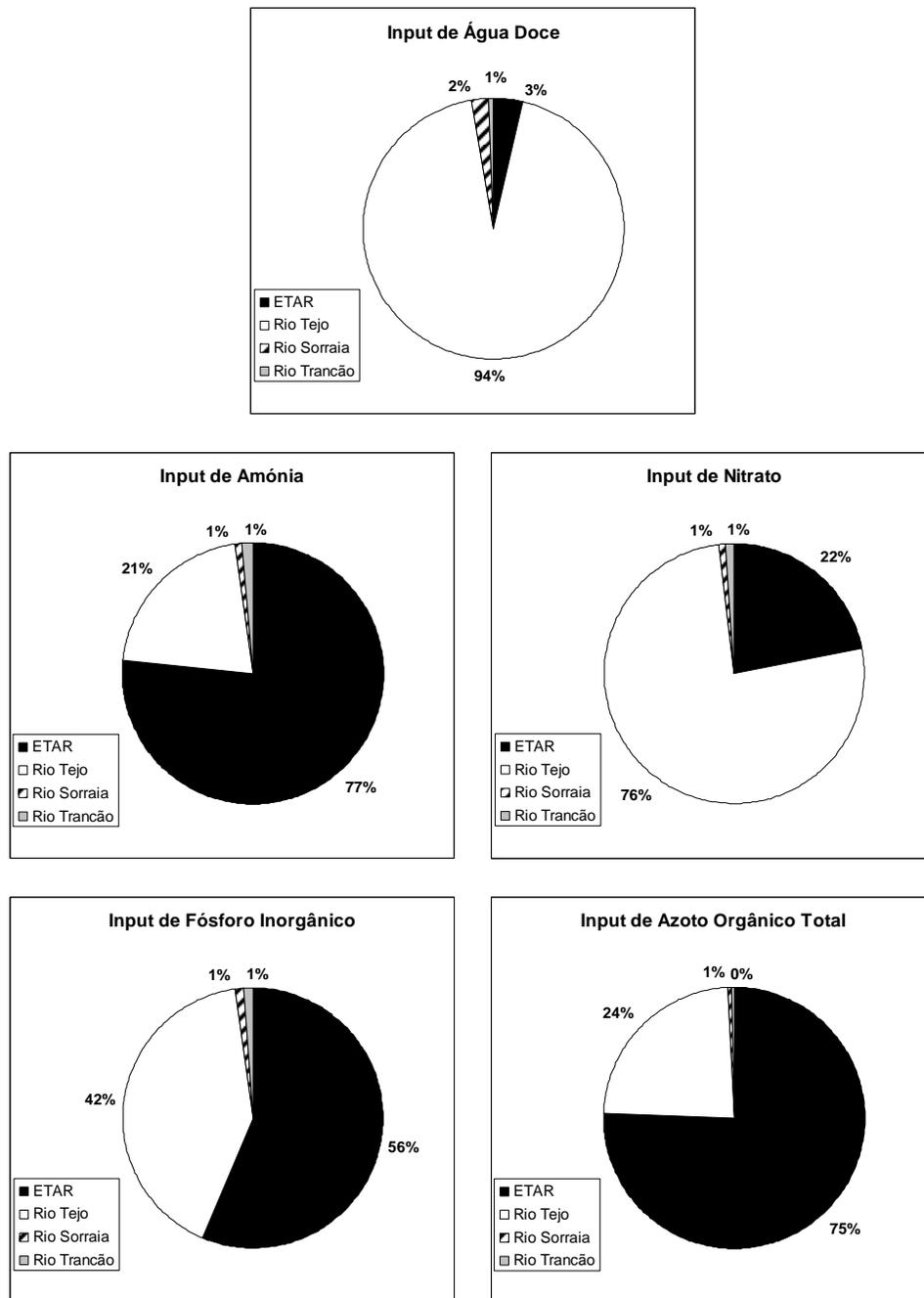


Figura 21. Contribuição Relativa das diversas descargas existentes no Estuário do Tejo: caudal, Fósforo inorgânico, nitrato e amónia.

### 3 Situação de Referência

#### 3.1 Hidrodinâmica do Sistema

A circulação no estuário do Tejo é forçada essencialmente pela maré (semi-diurna). Na embocadura a amplitude média corresponde a 2 metros, aumentando até 2.7 em situação de maré viva média, enquanto que no interior do estuário a maré é amplificada, atingindo os 3.5 metros. As velocidades típicas são da ordem de 1 m/s. As velocidades máximas registam-se na zona do canal principal podendo atingir os 2.5 m/s em maré viva, junto à embocadura. A **Error! Reference source not found.** e Figura 23 representam respectivamente a distribuição de velocidades em situação de enchente e vazante para condições consideradas como típicas e as Figura 24 representa o campo de velocidades residual na zona de montante e jusante do estuário.

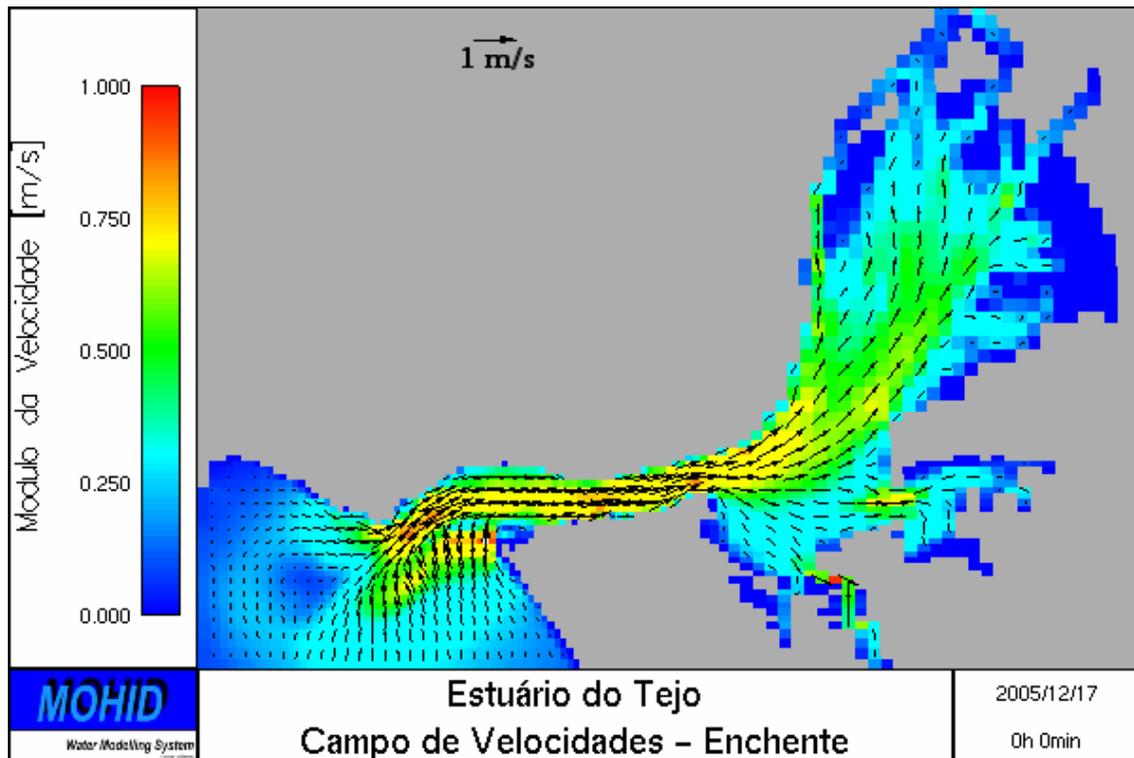


Figura 22. Campo de velocidade no Estuário do Tejo em situação de enchente.

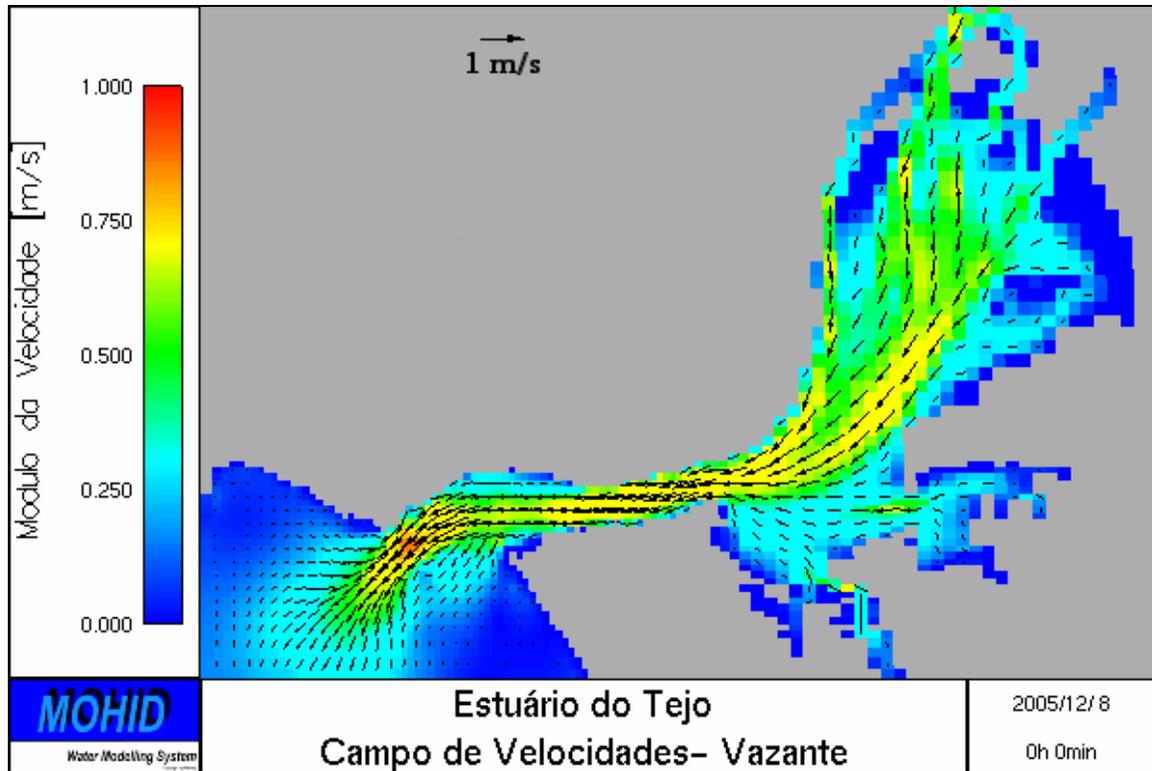


Figura 23. Campo de velocidade no Estuário do Tejo em situação de vazante.

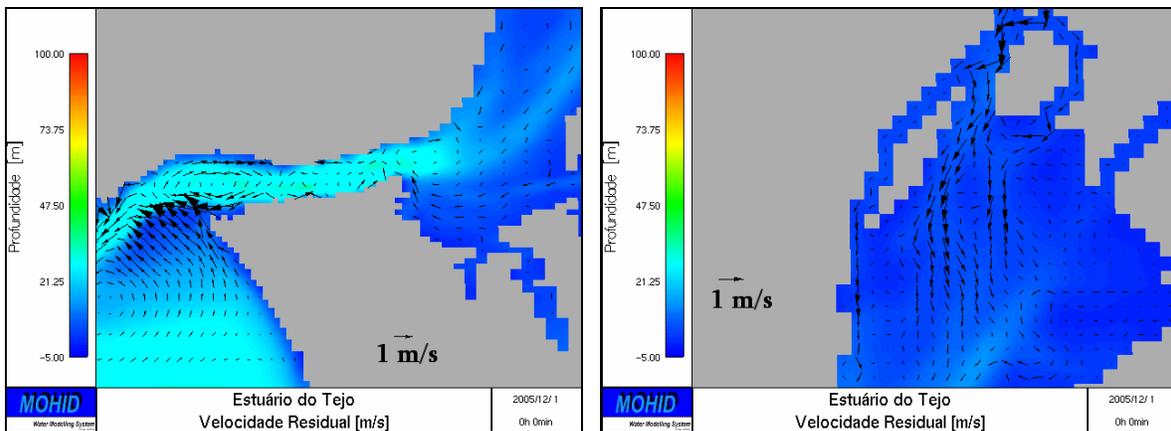


Figura 24. Campo residual de velocidade no Estuário do Tejo (jusante e montante).

Na Figura 25, que representa o fluxo residual [ $m^2/s$ ], é possível identificar um vórtice residual anti-ciclónico que ocupa o extremo de jusante da zona do canal, com velocidade no sentido do interior do estuário junto à margem norte e a sul com velocidade no sentido do mar. É ainda possível distinguir o jacto de saída e dois vórtices adjacentes.

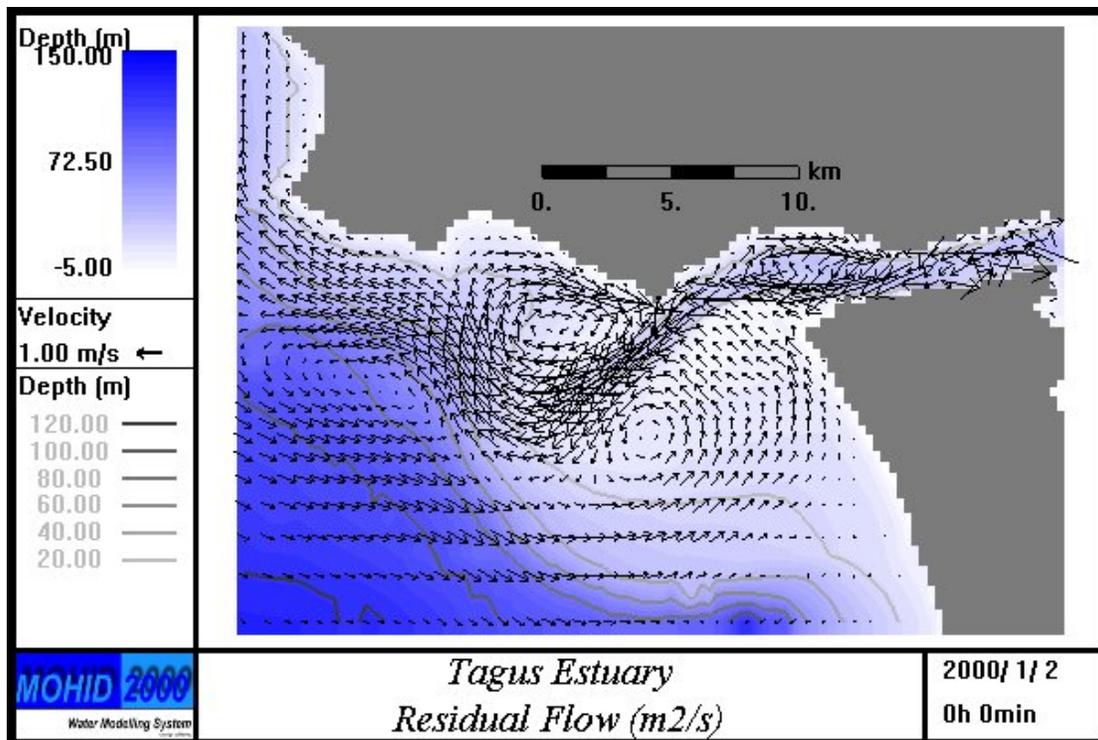


Figura 25. Fluxo residual no Estuário do Tejo.

## 3.2 Qualidade da Água

### 3.2.1 Séries Temporais do modelo vs. Dados de Campo

As figuras seguintes representam as séries temporais de resultados do modelo obtidas na célula correspondente a cada uma das estações de amostragem representadas na Figura 26 e os dados de campo do programa de monitorização SIMTEJO (entre Fevereiro de 2004 e Janeiro de 2006). Note-se que os resultados do modelo deverão ser comparados em primeira análise com os valores de campo referentes ao ano de 2005, ano de referência deste estudo, embora seja igualmente útil uma análise da variação inter-anual das propriedades. Opta-se neste relatório por apresentar apenas resultados referentes às estações da Figura 26 (5 estações), pois a representação e todas as estações implicaria uma sobrecarga do relatório. Estas estações permitem, no entanto, obter uma visão global dos resultados do modelo, caracterizando o seu comportamento face aos dados de campo, nas diferentes zonas do estuário. A estação ST91 localiza-se na proximidade do Rio Tejo, caracterizando assim a região de montante do estuário; a estação ST74 localiza-se na zona dos mouchões do Estuário do Tejo e caracteriza uma área de pouca profundidade; a estação ST53 localizada sensivelmente a meio do estuário, no canal principal, caracteriza uma zona de mistura elevada e a estação ST12 representa as condições de uma zona com uma influência oceânica mais acentuada. As séries temporais apresentadas referem-se à evolução de concentração das propriedades: salinidade, temperatura, sólidos suspensos totais, oxigénio dissolvido, amónia, nitrato, fósforo total e clorofila *a*.

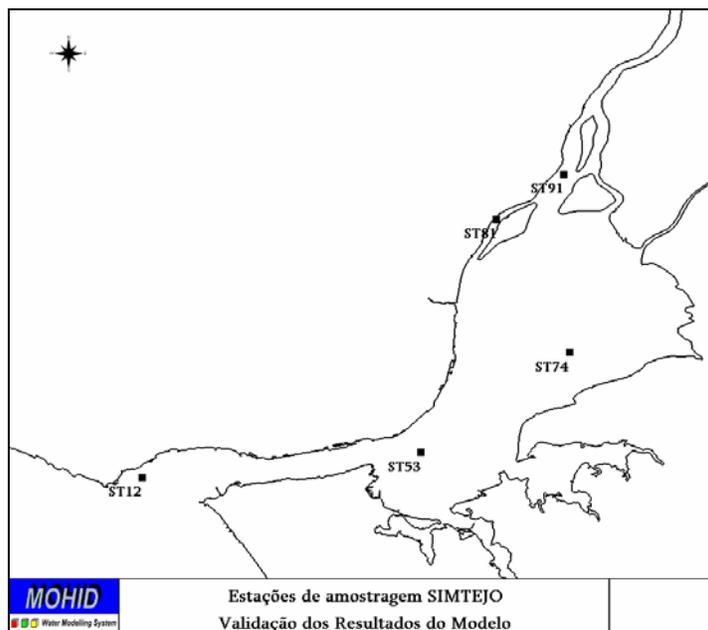


Figura 26. Localização das estações de amostragem utilizadas na validação dos resultados da modelação ecológica.

Para a estação ST91 (Figura 27), na proximidade do rio Tejo, verifica-se uma boa concordância entre os resultados do modelo e os dados de campo. Para todas as propriedades o modelo reflecte a gama de valores de campo, em particular para o ano de 2005. Este resultado significa que as condições de fronteira impostas no modelo para a caracterização do Estuário do Tejo estão correctas. Os resultados do modelo para a estação ST81 (Figura 28) são igualmente satisfatórios para as propriedades Temperatura, Oxigénio, Nitrato, Fósforo e em certa medida Clorofila\_*a*. No que diz respeito às propriedades Amónia, Salinidade e Sólidos Suspensos Totais os resultados do modelo tendem a ser inferiores às medidas e no caso de Amónia as diferenças são mais importantes nos meses de Outono/Inverno. Estas diferenças poderão ser explicadas pela possível falta de resolução da batimetria nesta zona (Cala do Norte), onde o tamanho da malha poderá condicionar o escoamento feito na realidade ao longo de pequenos canais e afectando assim a mistura entre água doce e salina. Semelhante situação ocorre na estação ST74 (Figura 29). Para as estações ST53 (Figura 30) e ST12 (Figura 31) os resultados do modelo são igualmente satisfatórios, apresentando nestas estações valores de salinidade mais próximas dos dados de campo. A concentração de sólidos suspensos totais apresenta-se à semelhança das estações anteriores, concentrações inferiores aos dados de campo, que embora não sendo restritivos no que diz respeito ao estudo pretendido, podem afectar de alguma forma o desempenho do modelo na reprodução das restantes propriedades. Menores concentrações de Sedimentos implicam maiores disponibilidades de luz, o que em termos dos resultados do modelo implicam uma ligeira tendência para a obtenção de concentrações de clorofila um pouco mais elevadas que os dados de campo. Note-se, no entanto que as evoluções sazonais obtidas pelo modelo reflectem muito satisfatoriamente a evolução dos dados de campo bem como, em geral é reproduzida a gama de variação das propriedades, colmatando até algumas falhas de amostragem.

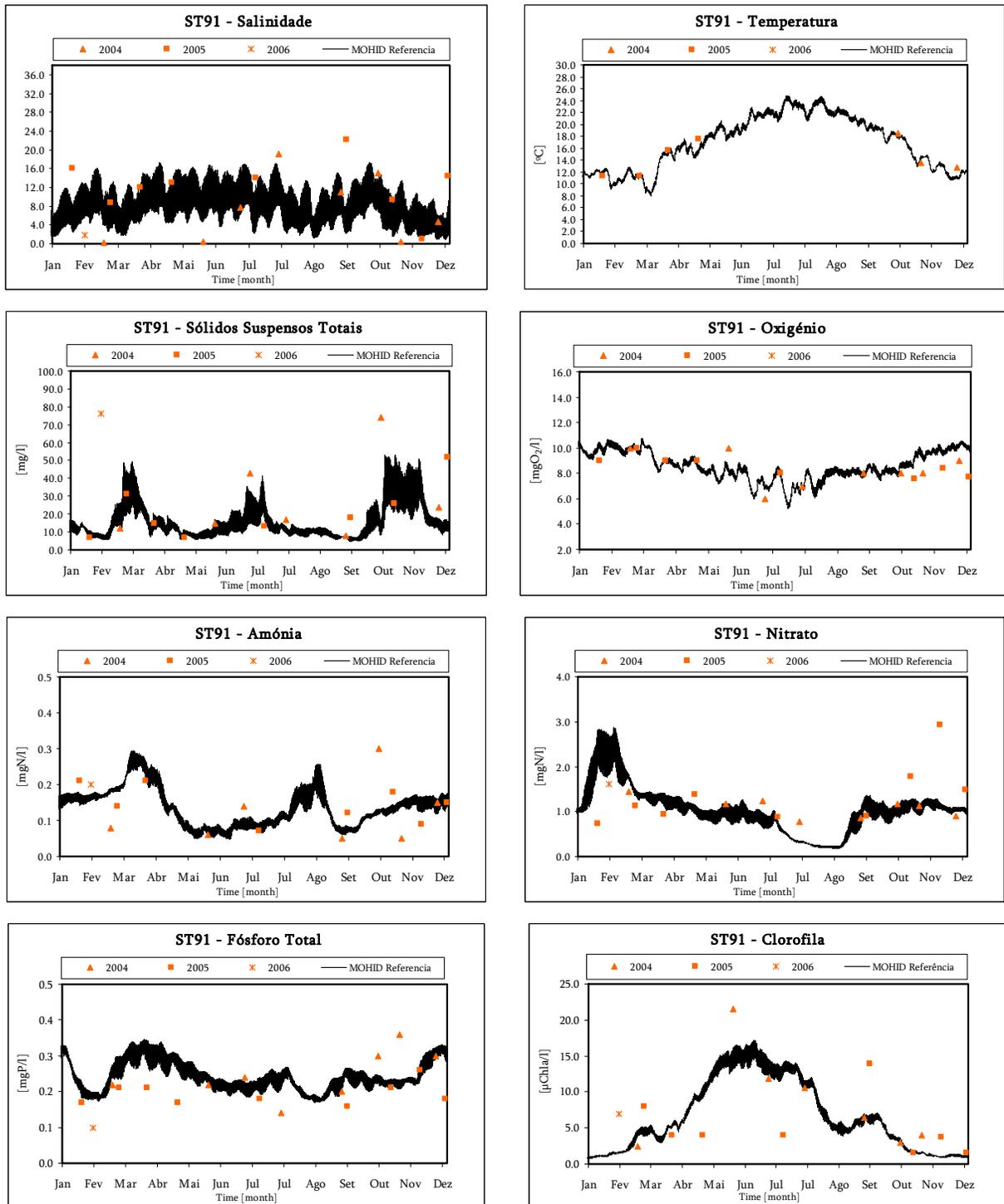


Figura 27. Estação de Amostragem ST91: Resultados do Modelo vs. Dados de Campo.

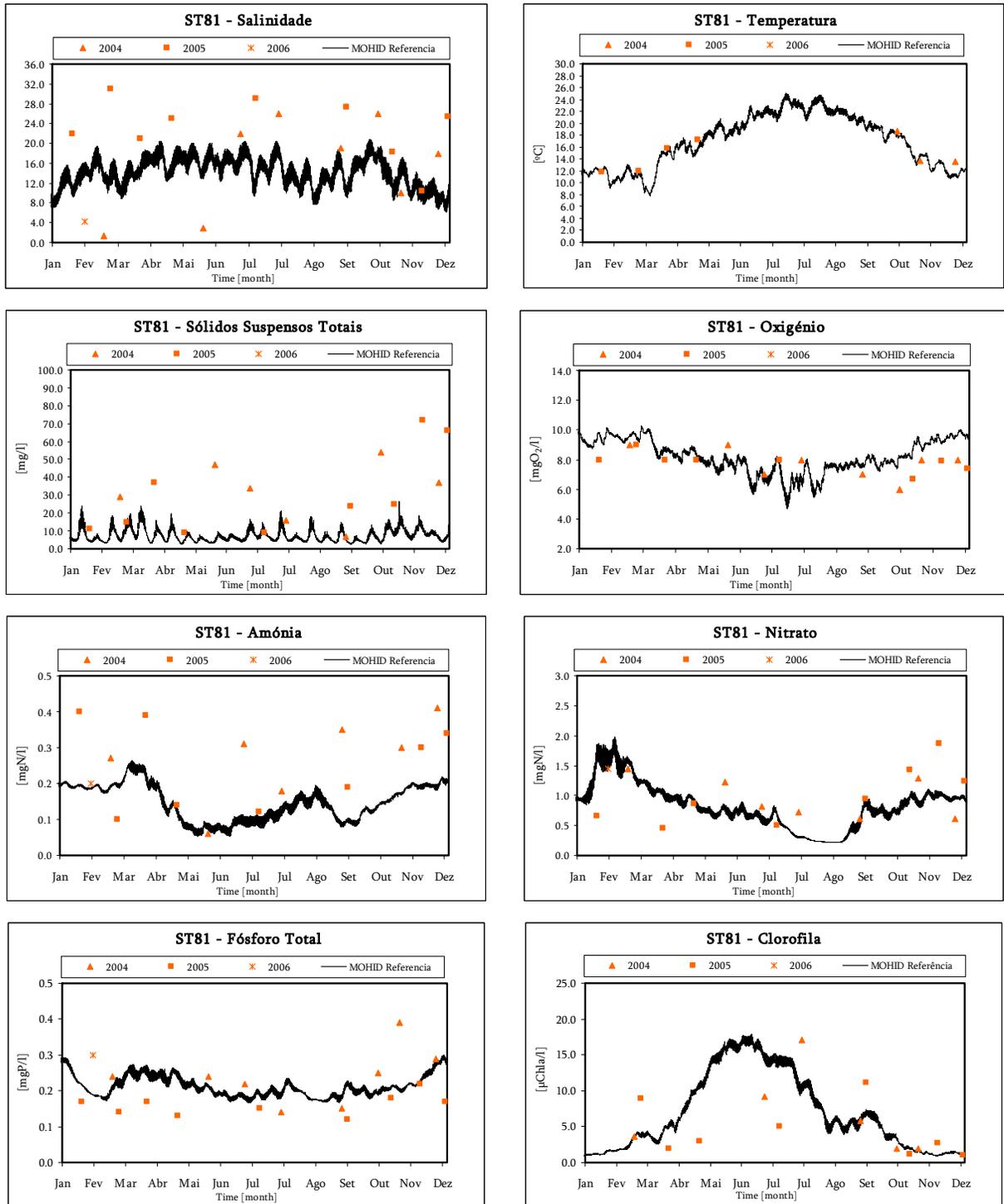


Figura 28. Estação de Amostragem ST81: Resultados do Modelo vs. Dados de Campo.

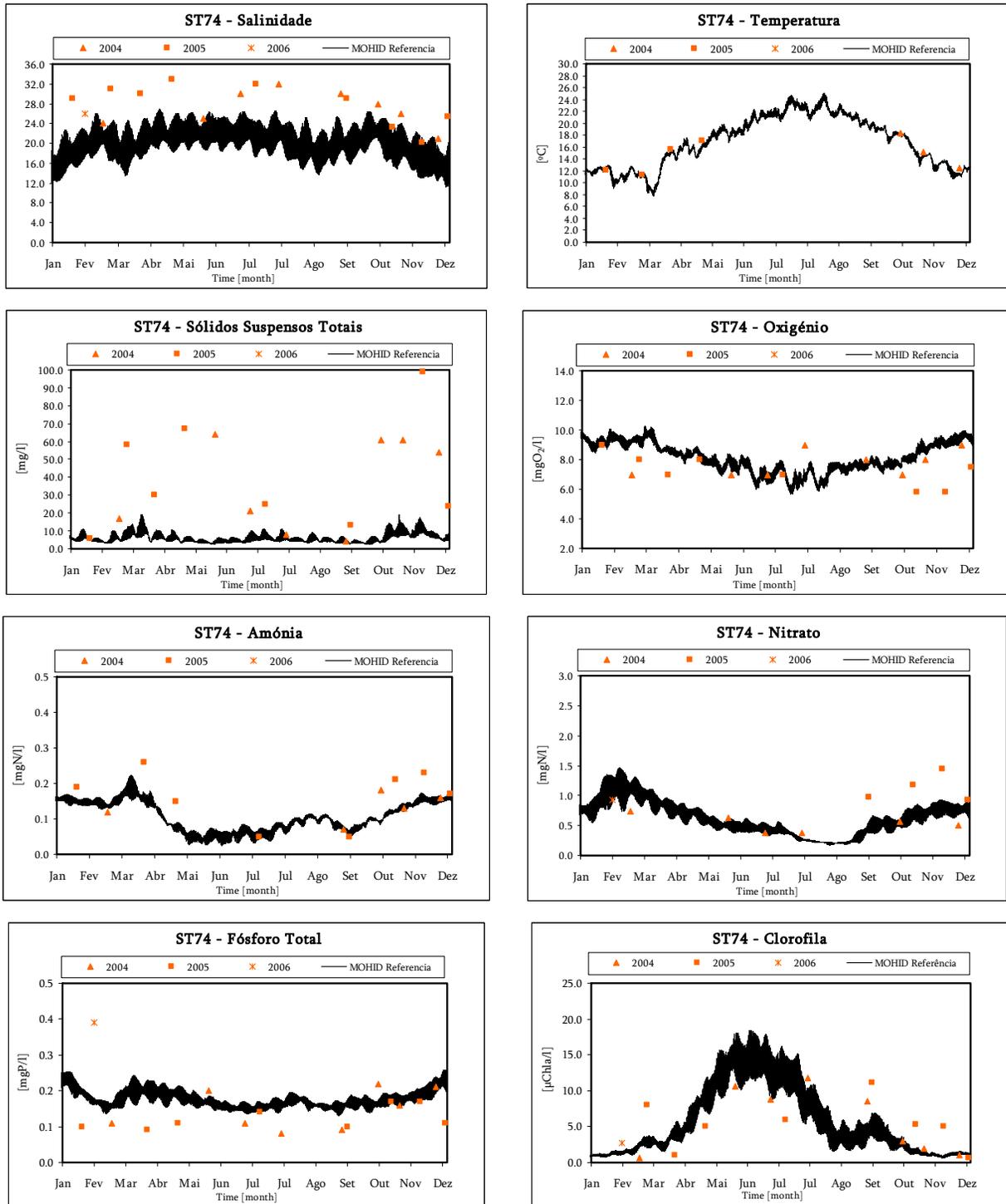


Figura 29. Estação de Amostragem ST74: Resultados do Modelo vs. Dados de Campo.

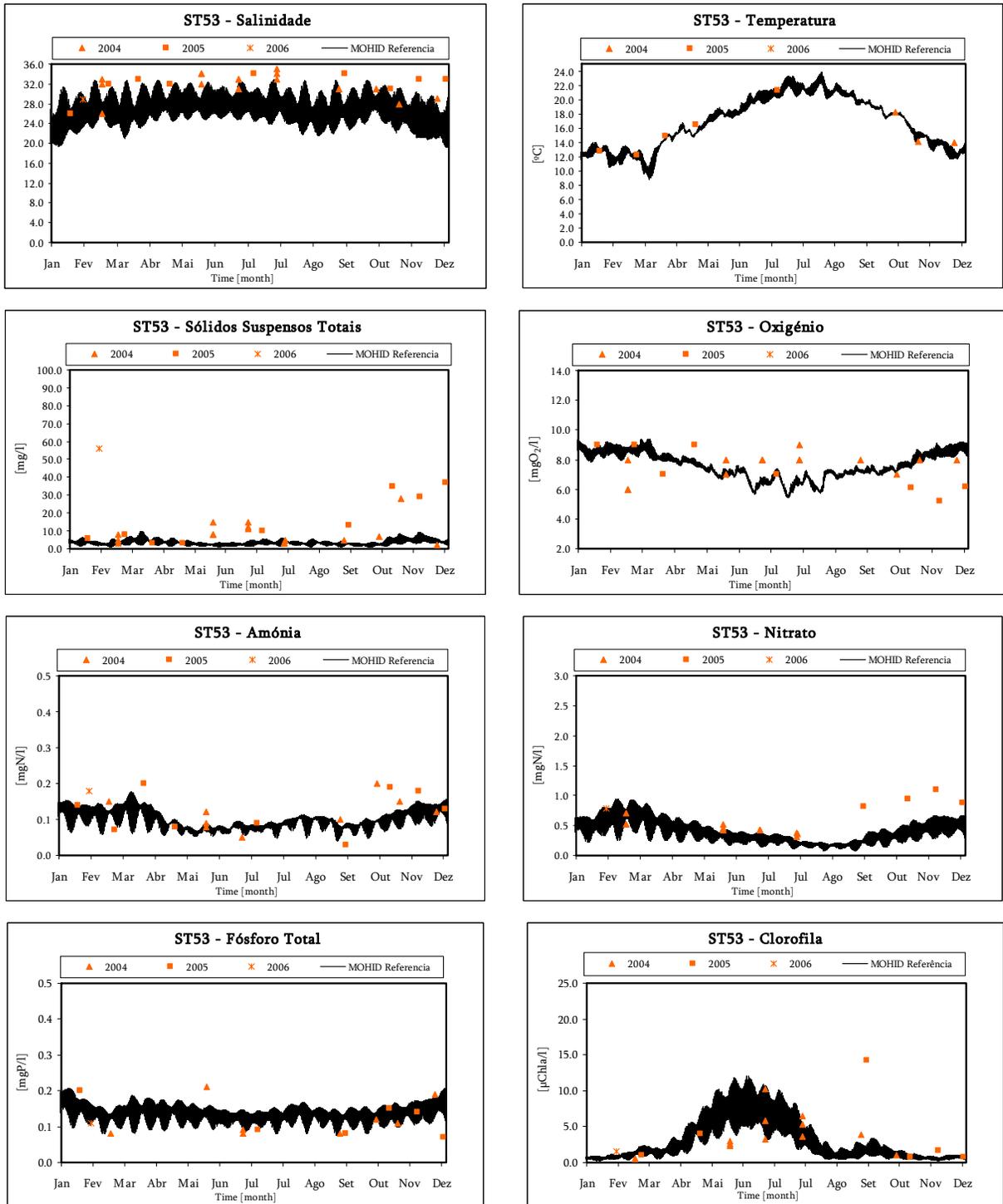


Figura 30. Estação de Amostragem ST53: Resultados do Modelo vs. Dados de Campo.

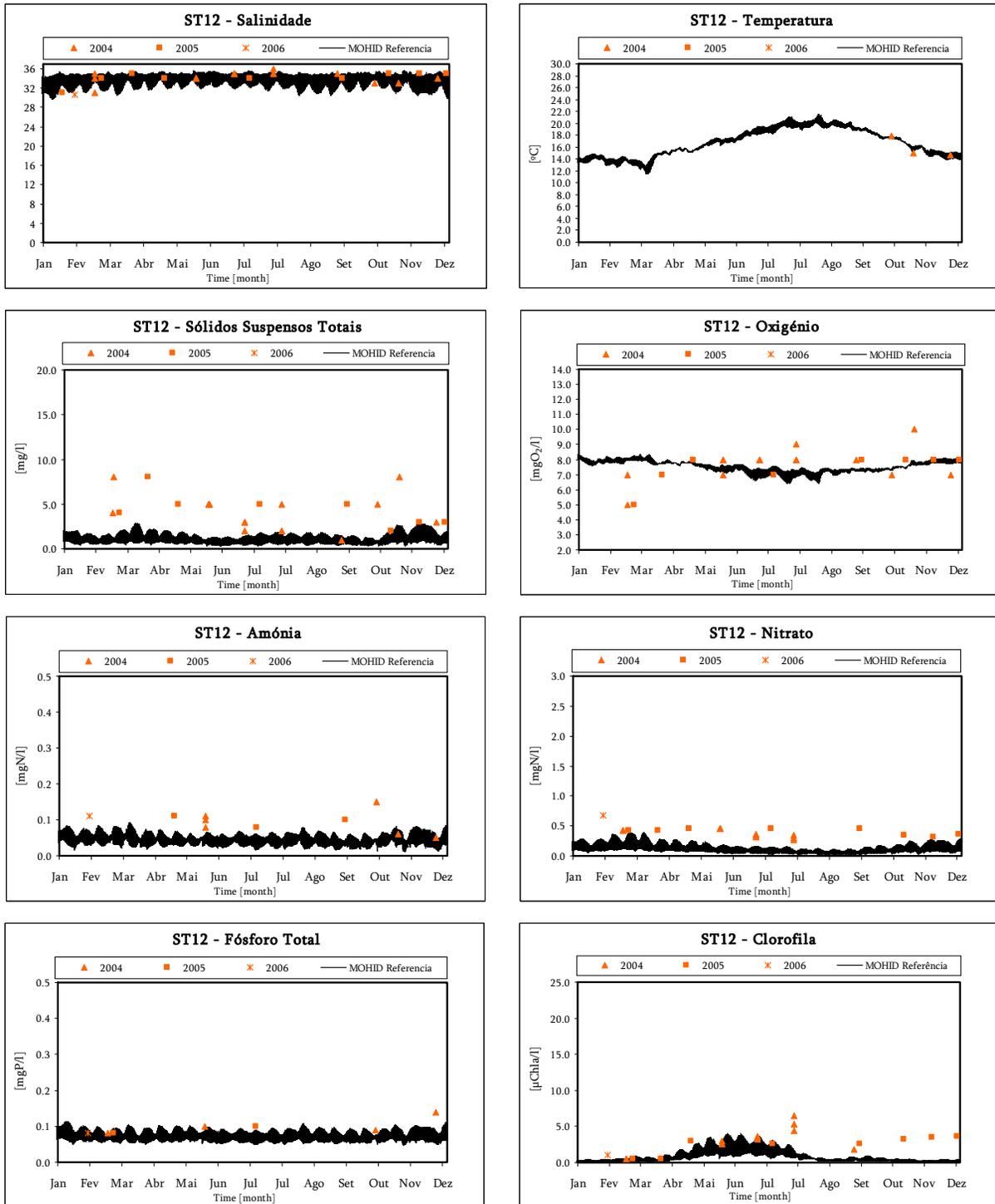


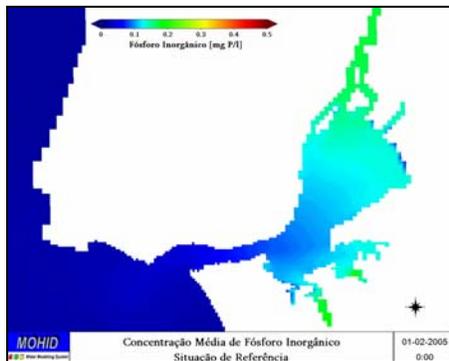
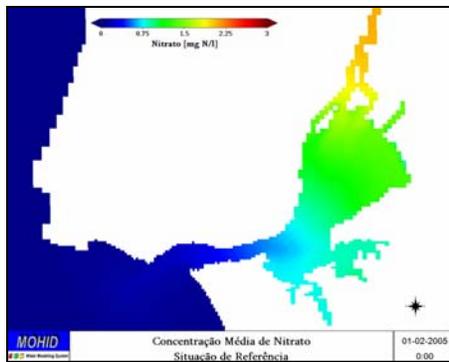
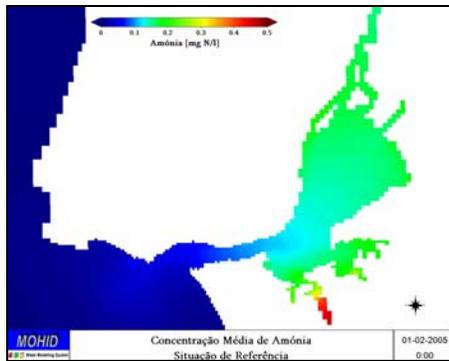
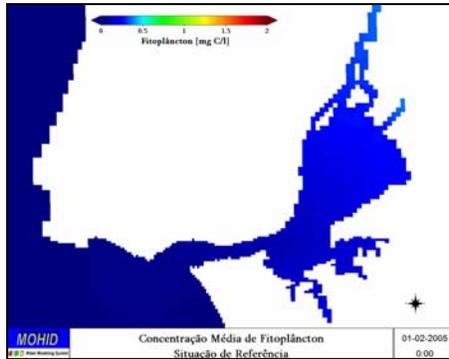
Figura 31. Estação de Amostragem ST12: Resultados do Modelo vs. Dados de Campo.

### 3.2.2 Distribuição Espacial das Propriedades

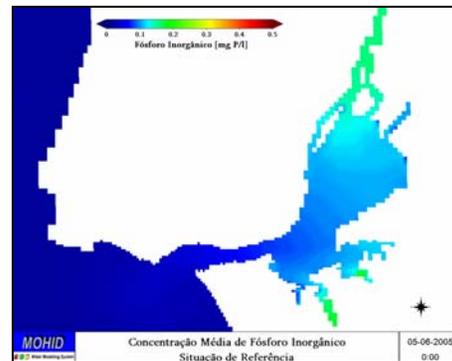
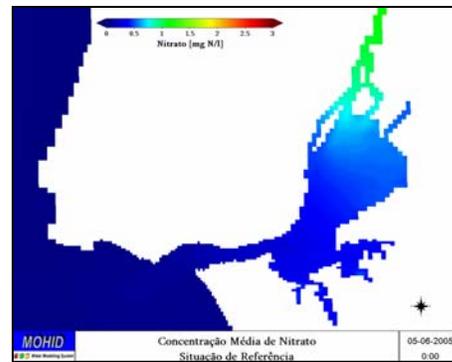
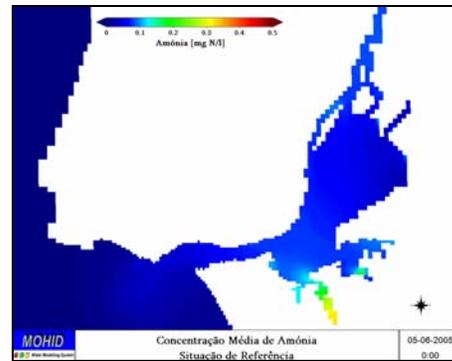
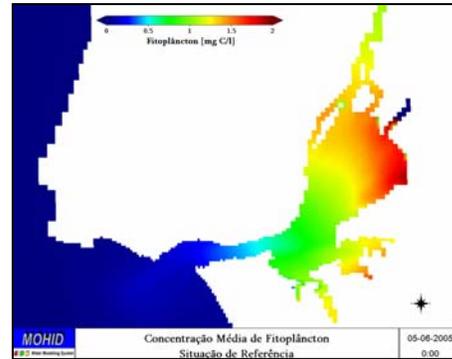
As figuras seguintes representam a distribuição espacial média das propriedades, obtida pelo modelo, para a Situação de Referência, nos meses de Fevereiro de 2005 e Junho de 2005.

Em Fevereiro a produção primária é diminuída, devido à falta de luz e temperaturas baixas, pelo que as concentrações de Fitoplâncton existentes no meio são baixas, contrastando com concentrações elevadas de nutrientes. Em Junho, verifica-se a situação oposta, com uma produção primária a intensa, devido ao aumento da radiação e conseqüente aumento de temperatura e luz disponível. Esta produção primária intensa é responsável por um consumo de nutrientes intenso no estuário, levando a sua concentração a níveis de concentração bastante baixos. Globalmente é possível verificar que a zona de maior produção é a zona de montante Este no estuário, junto à margem. Esta é a região onde as profundidades são mais baixas, ou seja, onde a disponibilidade de luz é elevada em toda a coluna de água e também onde o tempo de residência da água é elevado (INAG/MARETEC, 2002), permitindo aos processos biológicos excelentes condições. A figura referente ao mês de Junho representa de forma muito perceptível o gradiente espacial de concentração de fitoplâncton que varia entre 0.03 no oceano e 2 mgC/l na zona de maior produção. Já para os nutrientes, o seu gradiente é mais importante no mês de Fevereiro, com variações muito intensas entre montante e jusante. Note-se ainda que da análise das figuras se detecta no mês de Junho um aumento de concentração de amónia em algumas zonas próximas da margem sul. Este aumento poderá ser em grande medida uma conseqüência dos processos de mineralização da matéria orgânica, como reflexo do aumento da matéria orgânica existente na coluna de água devido a uma produção primária mais intensa. A mineralização da matéria orgânica torna-se mais importante nas zonas de deposição onde existe um tempo de residência mais elevado.

## FEVEREIRO 2005



## JUNHO 2005



**Figura 32. Situação de Referência: distribuição média nos meses de Fevereiro e Julho de 2005: Fitoplâncton, Amónia, Nitrato e Fósforo Inorgânico.**

### **3.2.3 Diferentes Zonas do Estuário**

O tipo de formato utilizado para a visualização dos resultados do modelo depende da análise pretendida e, neste estudo, opta-se também por aplicar o conceito de caixas de integração, já utilizado em estudos anteriores (*e.g.* Pina, 2001; INAG/MARETEC, 2002; INAG/MARETEC, 2003) por se considerar que estas permitem uma mais adequada representação dos resultados, facilitando a percepção dos processos envolvidos. A aplicação deste conceito consiste em agrupar células pertencentes a zonas específicas do estuário, caracterizadas quer pela sua localização, quer pela sua função no ecossistema. Em cada uma destas áreas é calculada uma média da concentração da propriedade, utilizando os valores calculados em cada célula. Assim sendo, é possível não só caracterizar determinadas áreas do estuário como também definir fluxos de propriedades entre caixas, o que, dependendo da análise, pode revelar-se uma ferramenta importante na compreensão da dinâmica do sistema. As caixas de integração consideradas neste estudo apresentam-se na Figura 33 e foram definidas em estudos anteriores (INAG/MARETEC, 2002) tendo em conta as características particulares de cada zona. As caixas 8 e 7 representam zonas de influência do Rio Tejo e as caixas 1 e 2 do Oceano. As zonas representadas pelas caixas 6, 3 e 2 são essencialmente de transporte e as caixas 4, 5, 9 e 10 são zonas onde as profundidades são mais baixas, velocidades reduzidas e o tempo de residência mais elevado.

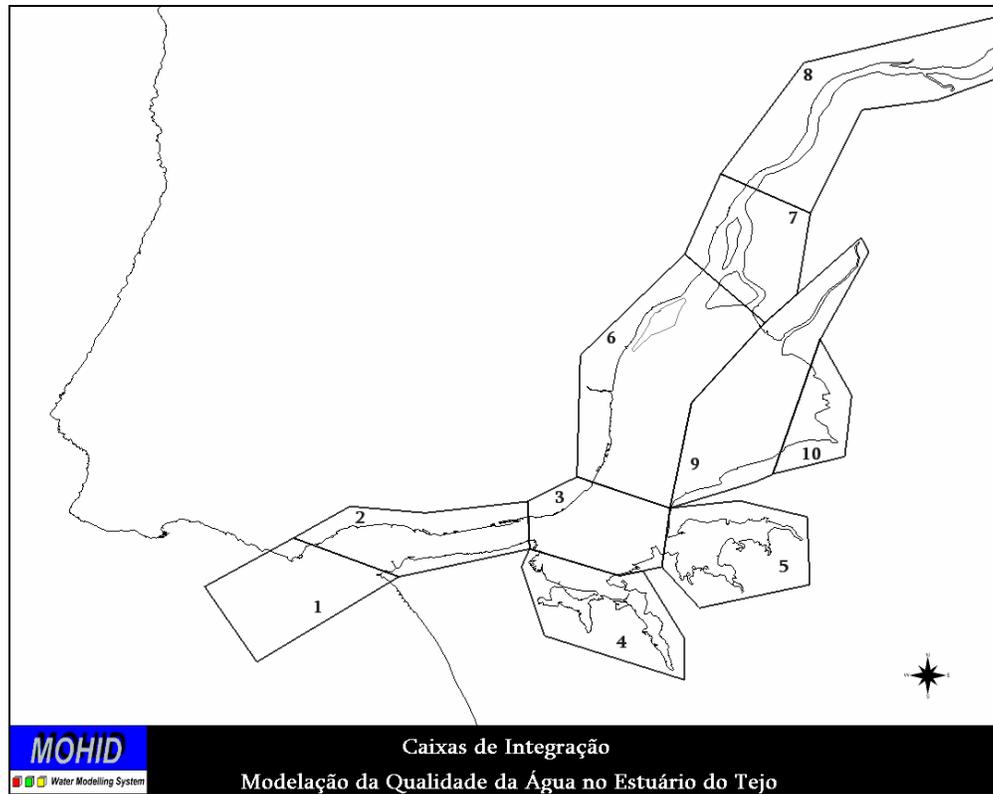


Figura 33. Caixas de Integração consideradas no estudo de modelação de qualidade da água do Estuário do Tejo.

### 3.2.3.1 Concentração em diferentes zonas do Estuário

A Figura 34 representa as concentrações médias anuais obtidas pelo modelo nas várias caixas de integração. Mais uma vez se verifica um gradiente horizontal muito acentuado em todas as propriedades. Em cada uma das caixas de integração o modelo permite ainda a monitorização da evolução sazonal média das propriedades na área definida pela caixa. A Figura 35 representa a evolução de concentração média de nutrientes e plâncton nas caixas 2 e 10, duas caixas com características totalmente diferentes. A caixa 10 apresenta durante todo o ano, concentrações mais elevadas que a caixa 2, em todas as propriedades. As gamas de concentração são substancialmente diferentes e é ainda possível reconhecer o efeito da maré na variação diária das propriedades, muito mais intensa na caixa 2. A variação sazonal, semelhante nas duas zonas embora quantitativamente diferentes, evidencia a existência de um pico de fitoplâncton nos meses de Junho/Julho, diminuindo em Agosto, seguido de um pico de Zooplâncton em Agosto. A evolução de nutrientes apresenta valores mais elevados em Outono/Inverno e uma diminuição durante o crescimento do fitoplâncton.

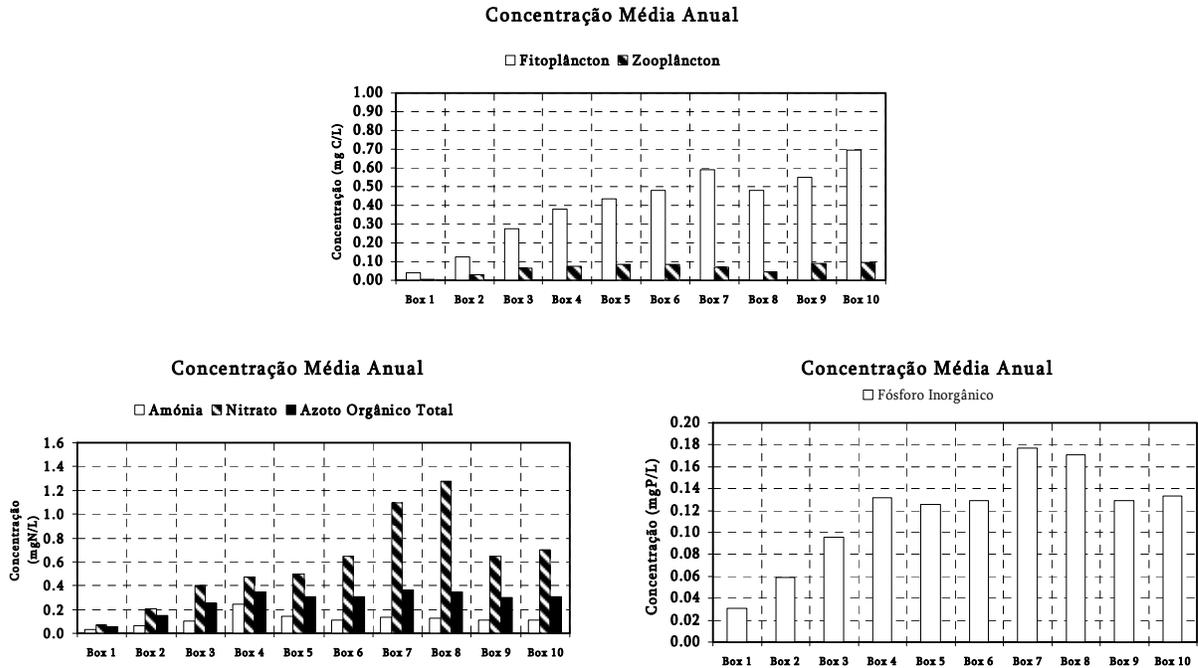


Figura 34. Concentração média anual das propriedades nas diferentes zonas do Estuário do Tejo: fitoplâncton, zooplâncton e nutrientes.

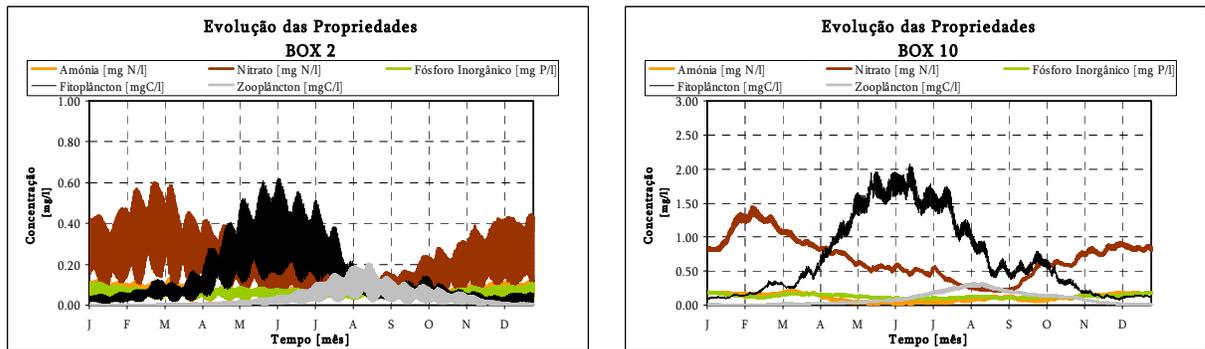


Figura 35. Evolução Sazonal das Propriedades nas Caixas 2 e 10.

### 3.2.3.2 Fluxos de Massa entre diferentes zonas do Estuário

A utilização do conceito de caixas de integração permite não só a análise das concentrações médias existentes, como também a análise dos fluxos de massa entre as diferentes zonas, apresentados entre a Figura 36 e a Figura 39. Em termos de fitoplâncton verifica-se que algumas das caixas, embora não possuindo fluxos de entrada, existe um fluxo de saída significativo, como é o caso das caixas 4, 5 e 6. Este fluxo de saída reflecte a produção de fitoplâncton existente na zona. Verifica-se ainda que a caixa 9 apresenta também um fluxo de saída bastante elevado face aos valores de *input* (trocas com a caixa 10 e *input* do Rio Sorraia). Identificam-se assim, estas zonas como as mais produtivas no estuário. Relativamente à caixa 4 e 10 é ainda

possível detectar a existência de um fluxo de saída de amónia algo significativo. Tratando-se estas áreas de zonas com elevada produção de matéria orgânica e consequente consumo de nutrientes, este fluxo de saída deve-se essencialmente ao processo de mineralização.

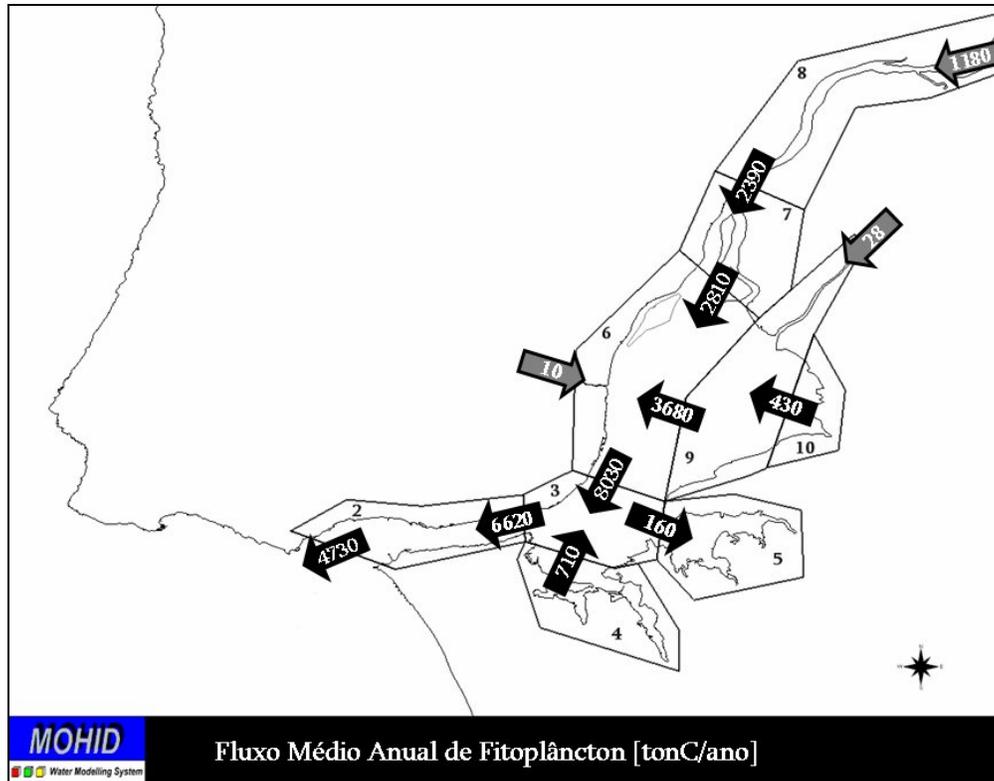


Figura 36. Fluxo Médio Anual de Fitoplâncton entre zonas do estuário.

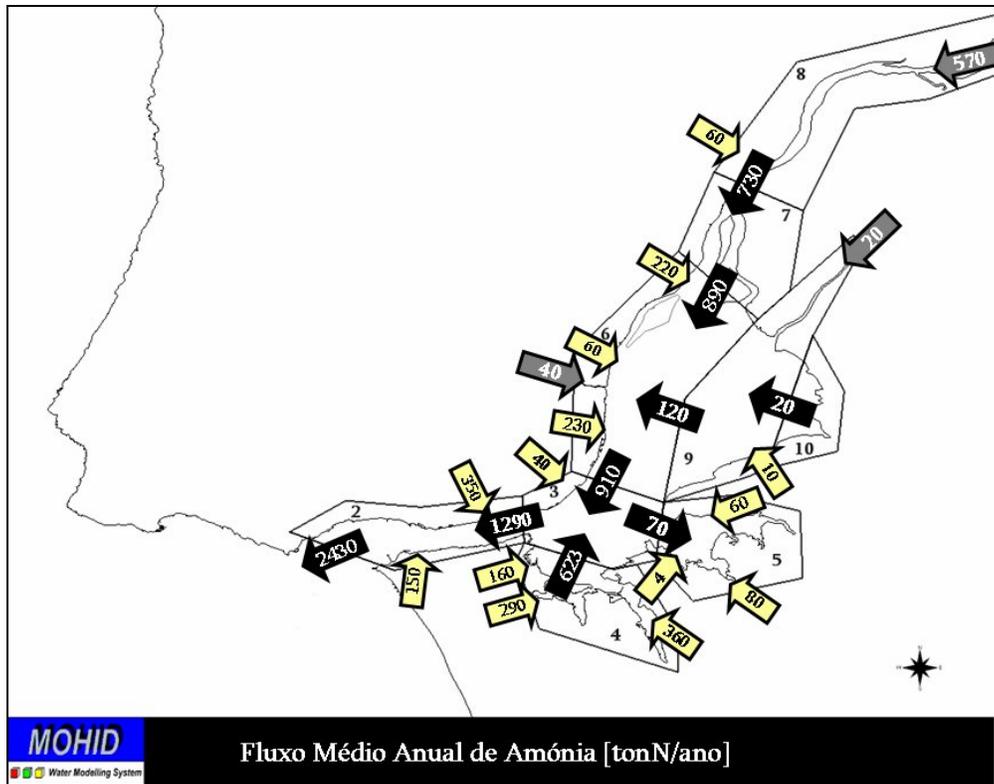


Figura 37. Fluxo Médio Anual de Amónia entre zonas do estuário.

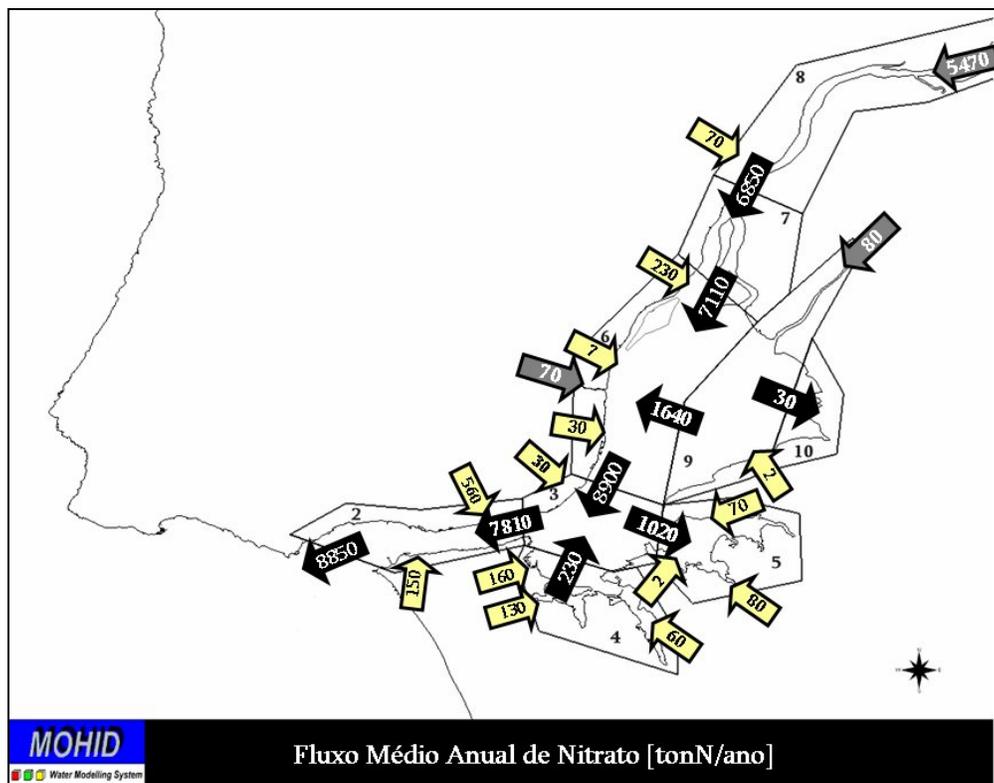


Figura 38. Fluxo Médio Anual de Nitrato entre zonas do estuário.

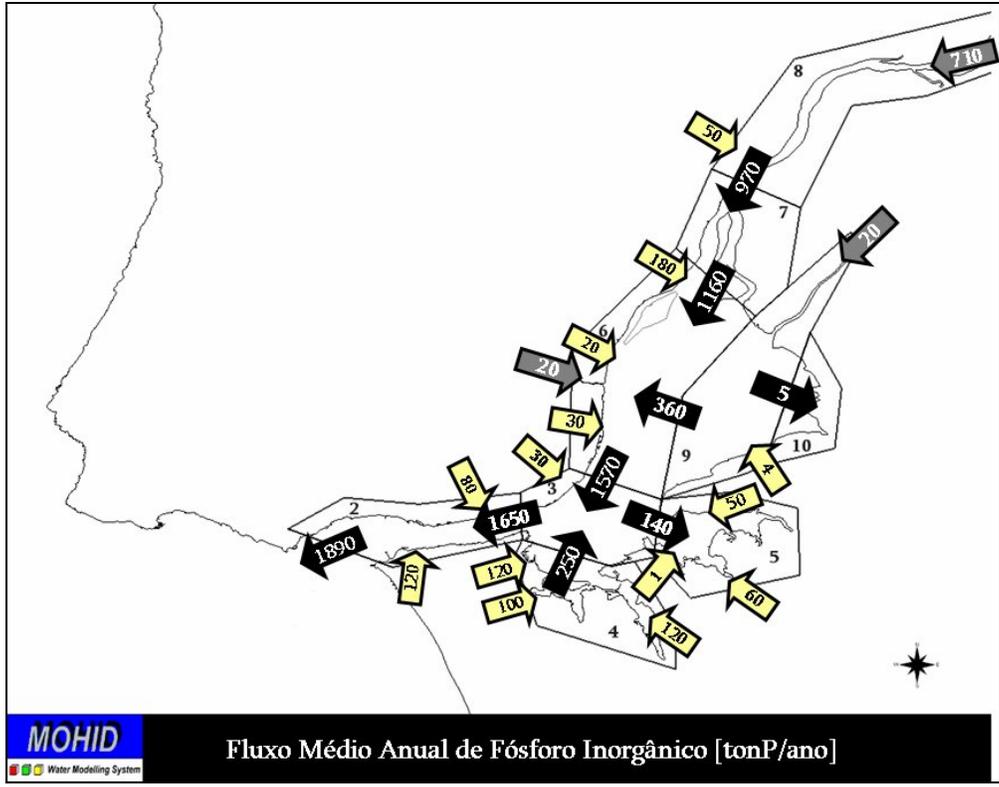


Figura 39. Fluxo Médio Anual de Fósforo Inorgânico entre zonas do estuário.

A análise dos fluxos de massa permite ainda o cálculo do balanço global do estuário para as várias propriedades. Este balanço global encontra-se representado na Figura 40 e no fundo representa a comparação entre o *input* total da propriedade para o estuário e o fluxo de saída. O fluxo de saída será considerado neste estudo como o fluxo entre as caixas 2 e 1. Verifica-se que existe uma produção significativa de fitoplâncton no interior do estuário. Esta produção é certamente feita à custa de um consumo de nutrientes que é evidente no caso do balanço total de amónia no sistema, onde se verifica um consumo global. No caso do Nitrato e Fósforo Inorgânico verifica-se, no entanto que existe no interior do estuário uma produção destes dois nutrientes. Esta produção, mais importante no caso do nitrato surge como resultados dos processos de mineralização da matéria orgânica – note-se o consumo existente na propriedade Azoto Orgânico Particulado – cujos produtos finais são fósforo inorgânico e amónia. A amónia é depois sujeita ao processo de nitrificação, explicando o aumento de Nitrato no fluxo de saída do estuário.

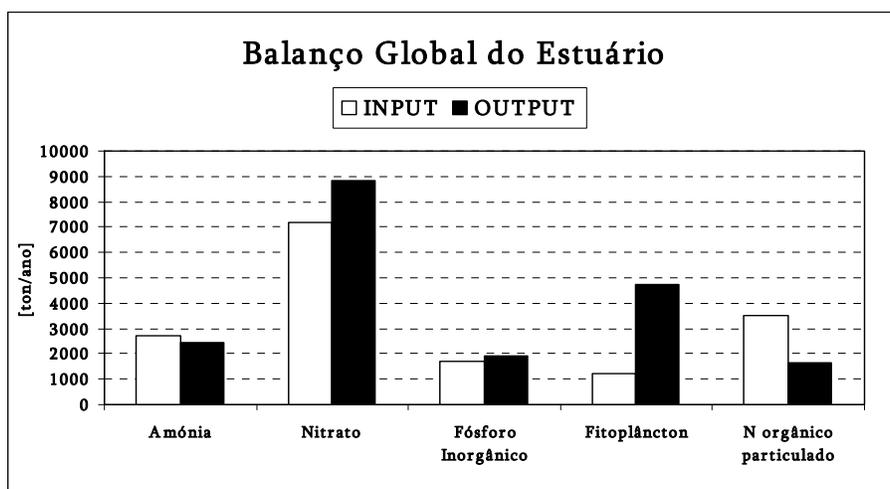


Figura 40. Balanço Global do Estuário na Situação de Referência.

### 3.2.4 Factores Limitantes da produção primária

O modelo permite ainda obter a evolução dos factores limitantes da produção primária, representados na (Figura 41), para a caixa 10, que é a zona de maior produção primária do Estuário do Tejo. O valor do factor limitante varia entre **0** representando uma limitação máxima ao crescimento do organismo e **1**, que indica que não existe limitação do crescimento devido a este factor.

A figura permite confirmar que ao longo do ano existe uma alteração dos principais factores limitantes no sistema. No início do ano, entre os meses de Janeiro e Fevereiro a temperatura da água é inferior ao valor óptimo de crescimento dos organismos e isso reflecte-se num factor limitante baixo, principal responsável pela inibição do crescimento. Com o aumento da radiação e o conseqüente aumento da temperatura da água, o factor limitante deixa gradualmente de ser a temperatura e passa a ser a luz, mantendo-se este factor o mais

limitante durante todo o período de maior crescimento dos seres fotossintéticos. Este período de maior crescimento pode ser identificado na figura como o período no qual os três factores limitantes são mais próximos de 1, ou seja, aproximadamente entre Março e Setembro. Note-se ainda que durante este período o factor limitante Luz diminui entre Março e Julho, em consequência do aumento de concentração de matéria orgânica na coluna de água que condiciona a disponibilidade de luz. Entre Julho e Setembro, depois do pico de concentração ter sido atingido e durante a diminuição de concentração de Fitoplâncton e matéria orgânica em geral, a disponibilidade de luz volta gradualmente a aumentar e o factor limitante assume valores mais próximos de 1. A partir de Setembro/Octubre, a intensidade luminosa decresce e com ela a temperatura da água que conduz gradualmente o factor limitante Temperatura a valores mais baixos que os restantes factores, tornando-se de novo o principal factor limitante.

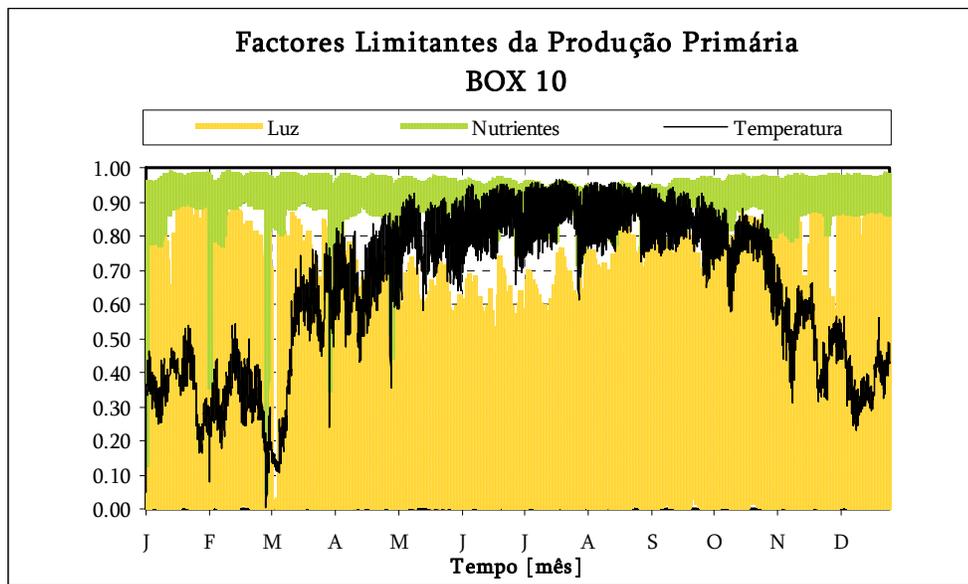


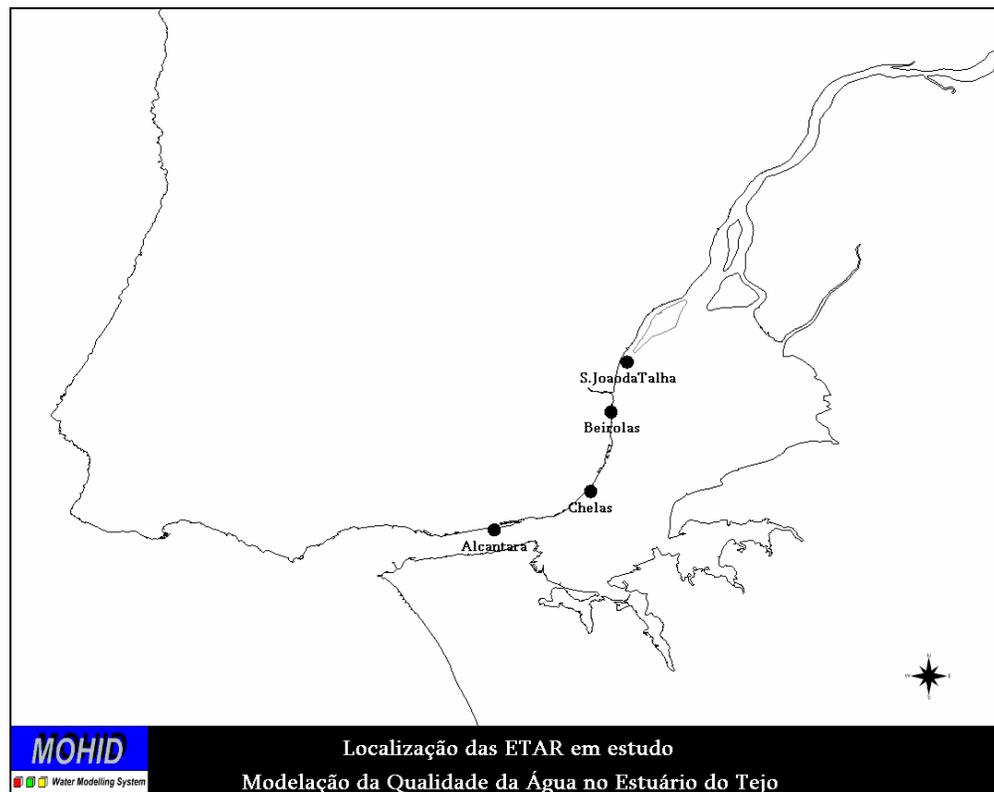
Figura 41. Factores Limitantes da Produção Primária na caixa 10.

## 4 Cenários de Gestão

Como referido anteriormente, tendo em conta o objectivo deste estudo, foram simulados além da situação de referência, 2 cenários de gestão adicionais. Através da comparação dos resultados do modelo obtidos em ambos os cenários com os resultados correspondentes à situação de referência é possível induzir sobre os efeitos de remoção de nutrientes na qualidade da água do Estuário do Tejo. Os cenários diferem apenas na concentração de nutrientes emitida em 4 ETAR geridas pela SIMTEJO – Alcântara, Chelas, Beirolas e S. João da Talha (Figura 42): (i) Cenário 1 – Licença de Descarga, corresponde a uma situação onde as descargas das 4 ETAR correspondem aos valores descritos na licença de descarga e cujas restrições se apresentam na Tabela 9; (ii) Cenário 2 – Descarga Nula, onde se considera a existência de uma eficiência de tratamento de remoção de nutrientes de 100%, nas 4 ETAR, o que equivale a uma situação em que o efluente da ETAR é apenas água limpa. Este cenário hipotético tem como objectivo determinar o impacte total das 4 ETAR.

**Tabela 9. Valores impostos na licença de descarga.**

<b>Propriedades</b>	<b>Valor Limite</b>
Azoto Total [mg N/l]	15
Nitrato [mg NO <sub>3</sub> /l]	50
Fósforo Total [mg P/l]	10



**Figura 42. Localização das ETAR em estudo.**

As tabelas seguintes (Tabela 10 até Tabela 13) apresentam os valores de concentração utilizados nos vários cenários. Os cenários serão comparados em termos de mapas de distribuição, séries temporais em algumas estações de amostragem e ainda em termos de balanço global do estuário.

**Tabela 10. Descarga da ETAR de Alcântara: valores considerados nos cenários em estudo.**

ALCÂNTARA				
Parâmetro	Situação de Referência	Cenário 1 - Licença de Descarga	Cenário2 - Descarga Nula	
Amónia	[mgN/l]	26.21	2.70	0.00
Nitrato	[mgN/l]	18.78	4.35	0.00
Nitrito	[mgN/l]	0.10	0.1	0.00
DONr	[mgN/l]	8.61	1.19	0.00
DONnr	[mgN/l]	28.70	2.78	0.00
PON	[mgN/l]	41.00	3.98	0.00
SST	[mg/l]	120.00	120.00	0.00
Oxigénio Dissolvido	[mg/l]	5.00	5.00	0.00
DOPr	[mgP/l]	0.06	0.60	0.00
DOPnr	[mgP/l]	0.14	1.50	0.00
Fósforo Inorgânico	[mgP/l]	1.00	7.00	0.00
POP	[mgP/l]	1.00	0.90	0.00

**Tabela 11. Descarga da ETAR de Beirolas: valores considerados nos cenários em estudo.**

BEIROLAS				
Parâmetro	Situação de Referência	Cenário 1 - Licença de Descarga	Cenário2 - Descarga Nula	
Amónia	[mgN/l]	12.16	2.70	0.00
Nitrato	[mgN/l]	5.88	4.35	0.00
Nitrito	[mgN/l]	0.10	0.10	0.00
DONr	[mgN/l]	0.93	1.19	0.00
DONnr	[mgN/l]	2.18	2.78	0.00
PON	[mgN/l]	2.62	3.98	0.00
SST	[mg/l]	8.20	8.20	0.00
Oxigénio Dissolvido	[mg/l]	7.90	7.90	0.00
DOPr	[mgP/l]	0.12	0.60	0.00
DOPnr	[mgP/l]	0.28	1.50	0.00
Fósforo Inorgânico	[mgP/l]	3.30	7.00	0.00
POP	[mgP/l]	0.10	0.90	0.00

**Tabela 12. Descarga da ETAR de Chelas: valores considerados nos cenários em estudo.**

CHELAS				
Parâmetro	Situação de Referência	Cenário 1 - Licença de Descarga	Cenário2 - Descarga Nula	
Amónia	[mgN/l]	1.98	2.70	0.00
Nitrato	[mgN/l]	5.83	4.35	0.00
Nitrito	[mgN/l]	0.10	0.10	0.00
DONr	[mgN/l]	0.75	1.19	0.00
DONnr	[mgN/l]	1.75	2.78	0.00
PON	[mgN/l]	2.12	3.98	0.00
SST	[mg/l]	10.16	10.16	0.00
Oxigénio Dissolvido	[mg/l]	7.80	7.80	0.00
DOPr	[mgP/l]	0.17	0.60	0.00
DOPnr	[mgP/l]	0.42	1.50	0.00
Fósforo Inorgânico	[mgP/l]	2.85	7.00	0.00
POP	[mgP/l]	0.29	0.90	0.00

**Tabela 13. Descarga da ETAR de S. João da Talha: valores considerados nos cenários em estudo.**

S.JOAO DA TALHA				
Parâmetro		Situação de Referência	Cenário 1 - Licença de Descarga	Cenário 2 - Descarga Nula
Amónia	[mgN/l]	14.35	2.70	0.00
Nitrato	[mgN/l]	1.64	4.35	0.00
Nitrito	[mgN/l]	0.85	0.85	0.00
DONr	[mgN/l]	4.01	1.19	0.00
DONnr	[mgN/l]	13.37	2.78	0.00
PON	[mgN/l]	19.10	3.98	0.00
SST	[mg/l]	81.79	81.79	0.00
Oxigénio Dissolvido	[mg/l]	7.85	7.85	0.00
DOPr	[mgP/l]	0.25	0.60	0.00
DOPnr	[mgP/l]	0.60	1.50	0.00
Fósforo Inorgânico	[mgP/l]	3.56	7.00	0.00
POP	[mgP/l]	0.44	0.90	0.00

## 4.1 Variabilidade Espacial

A sequência de figuras que se segue é constituída por mapas de diferenças relativas entre as distribuições médias calculadas pelo modelo nos meses de Fevereiro (onde a produção primária é baixa) e Junho (com produção primária mais intensa).

A distribuição relativa é calculada como a diferença entre os valores obtidos em cada uma das células do domínio no cenário em questão e o obtido na situação de referência, dividida pela concentração de referência. Obtém-se assim uma percentagem de diferença entre as simulações que permite obter uma quantificação das alterações provocadas no sistema devido a alterações de *input* de nutrientes no estuário, definidas em cada cenário.

Numa primeira análise verifica-se que em ambos os cenários as diferenças relativamente ao cenário de referência são negativas, o que significa que as alterações introduzidas nos cenários provocam globalmente uma diminuição da concentração média das propriedades no estuário. A excepção ocorre na propriedade Fósforo Inorgânico que apresenta no Cenário 1 (Licença de Descarga) um valor superior ao valor de referência em cerca de 20%. De facto, o valor estabelecido na licença de descarga para o limite de descarga de fósforo total é superior ao valor actual descarregado nas ETAR, razão pela qual existe no Cenário 1 um valor de concentração superior.

As diferenças máximas entre os cenários surgem na propriedade amónia, atingindo cerca de 30-40%, na zona de influência do Rio Trancão, com diferenças mais significativas no Cenário 2, onde as concentrações emitidas pelas ETAR são nulas. Relativamente ao Nitrato, as diferenças encontradas entre os cenários são da mesma ordem de grandeza e situam-se nos 10%, à semelhança das diferenças na concentração de Fósforo

Inorgânico entre os cenários de Referência e o Cenário 2. Assim, em termos de nitrato as diferenças calculadas para cada um dos cenários são semelhantes embora diferentes no caso da amónia. Este é um resultado que corrobora com dados e conclusões apresentadas anteriormente que classificam as ETAR como principais fontes de amónia no sistema e os rios como principais fontes de Nitrato e Fósforo Inorgânico.

Em termos sazonais, as diferenças são mais importantes nos meses de Primavera/Verão, justificadas pelo facto de a contribuição das ETAR é neste período do ano relativamente mais importante, já que a contribuição dos rios diminui significativamente em consequência da diminuição sazonal de caudal.

Apesar desta global diminuição na concentração de nutrientes (e aumento no caso de Fósforo Inorgânico, no Cenário 1) verifica-se que as diferenças encontradas em termos de concentração de fitoplâncton são pouco significativas – cerca de 1%, em ambos os cenários. Este é um resultado previsível tendo em conta as análises anteriores que indicam uma limitação mais intensa provocada pela falta de disponibilidade de luz e não de nutrientes, pelo que uma menor ou maior disponibilidade de nutrientes não terá globalmente um efeito muito significativo.

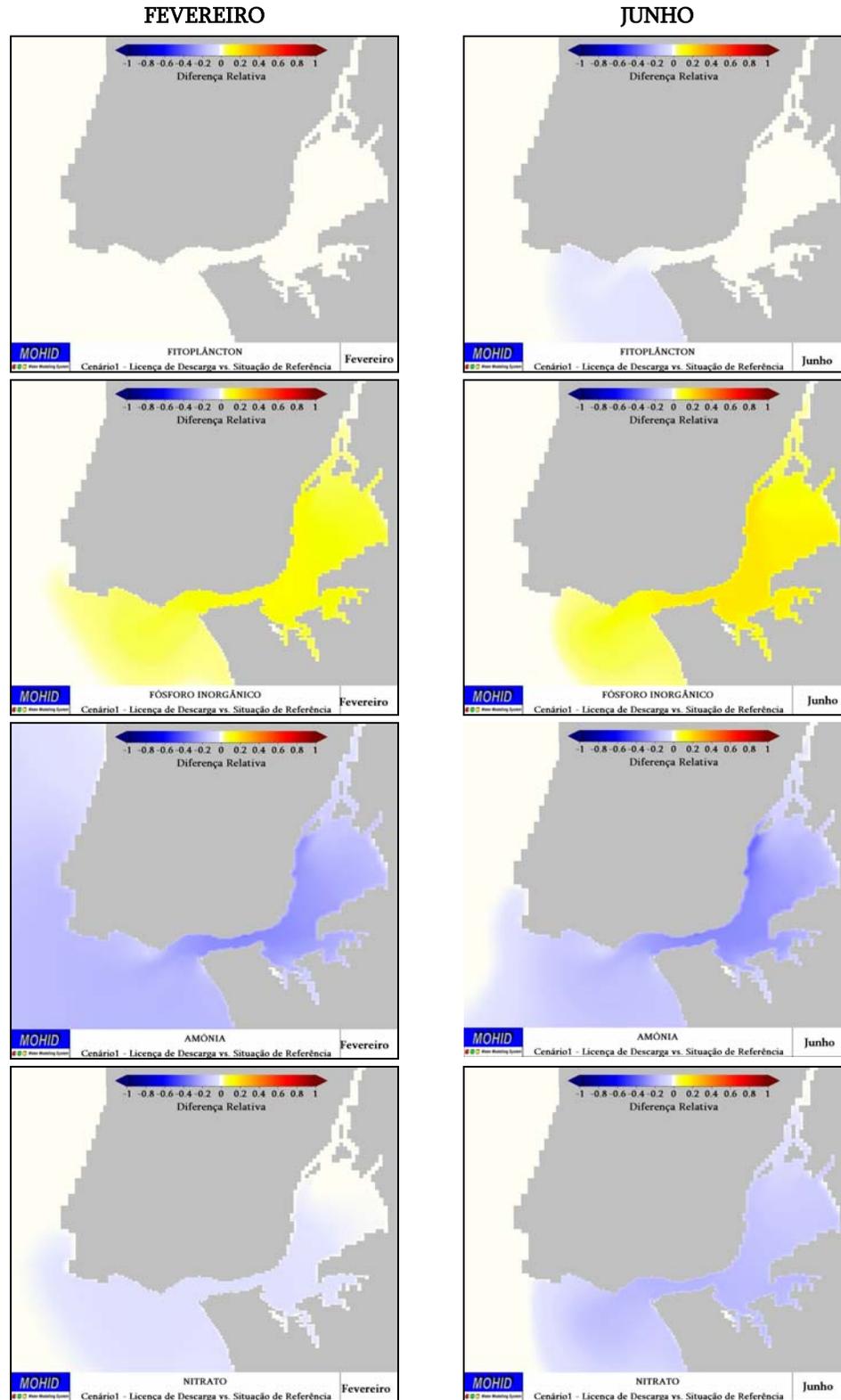


Figura 43. Cenário 1 (Licença de Descarga) vs. Situação de Referência: diferença relativa da distribuição média de concentrações nos meses de Fevereiro e Junho.

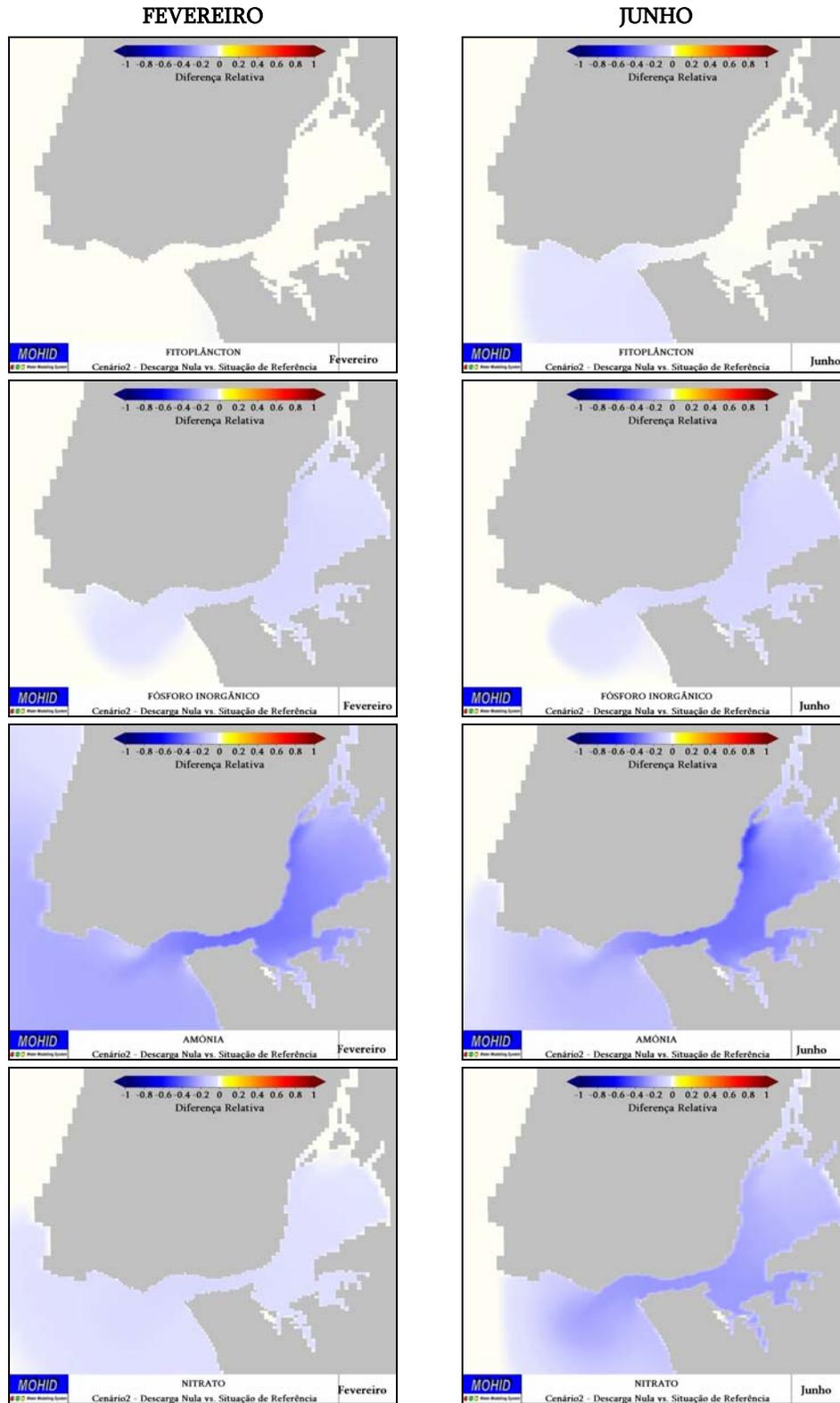


Figura 44. Cenário 2 (Descarga Nula) vs. Situação de Referência: diferença relativa da distribuição média de concentrações nos meses de Fevereiro e Junho.

## 4.2 Variabilidade Sazonal

As figuras seguintes representam a evolução sazonal das propriedades nos três cenários simulados e os dados de campo disponíveis em algumas estações de amostragem representadas na Figura 45.

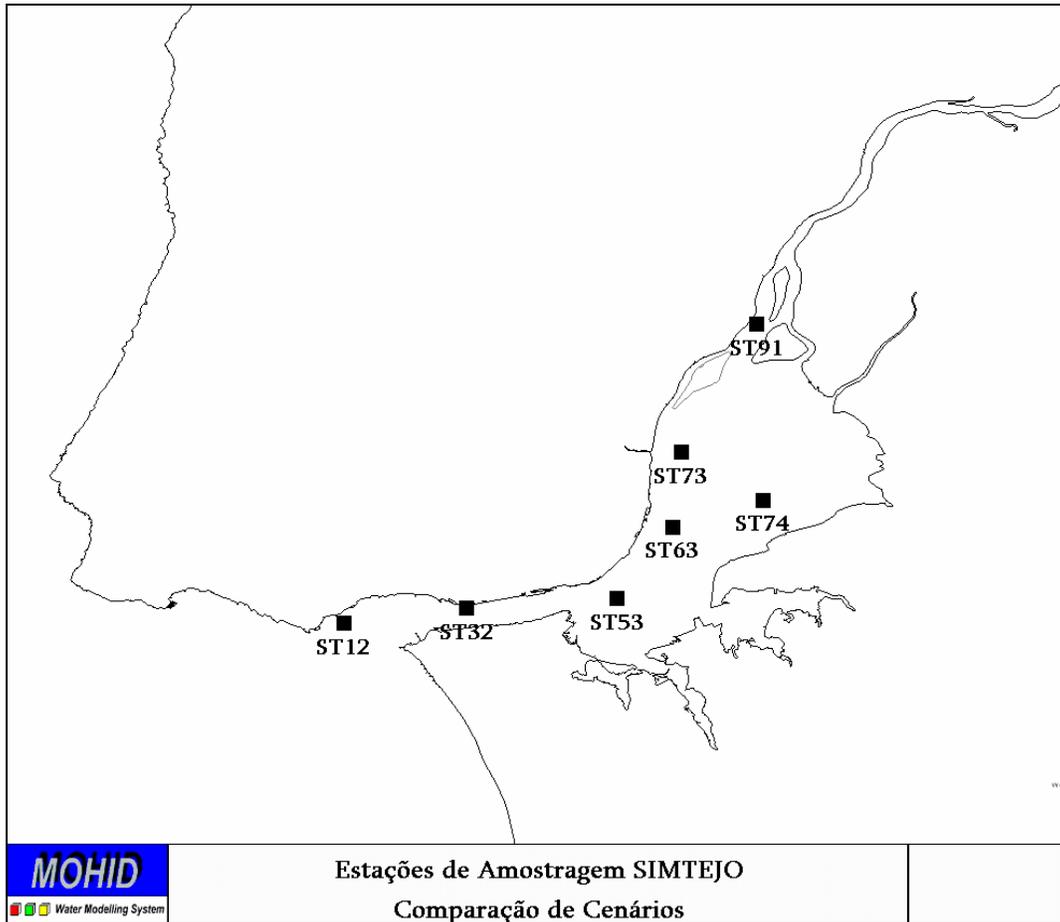


Figura 45. Estações de Amostragem utilizadas na comparação de cenários.

A análise sazonal das propriedades confirma a tendência evidenciada anteriormente de que as diferenças entre cenários são notórias nas propriedades amónia, nitrato e em certa medida fósforo inorgânico, embora não sejam perceptíveis na evolução da propriedade Clorofila. As figuras permitem ainda identificar que as diferenças no nitrato são mais importantes durante o Verão, altura em que a contribuição das ETAR se torna mais importante face à contribuição dos rios e um aumento global da propriedade Fósforo Total no Cenário 1.

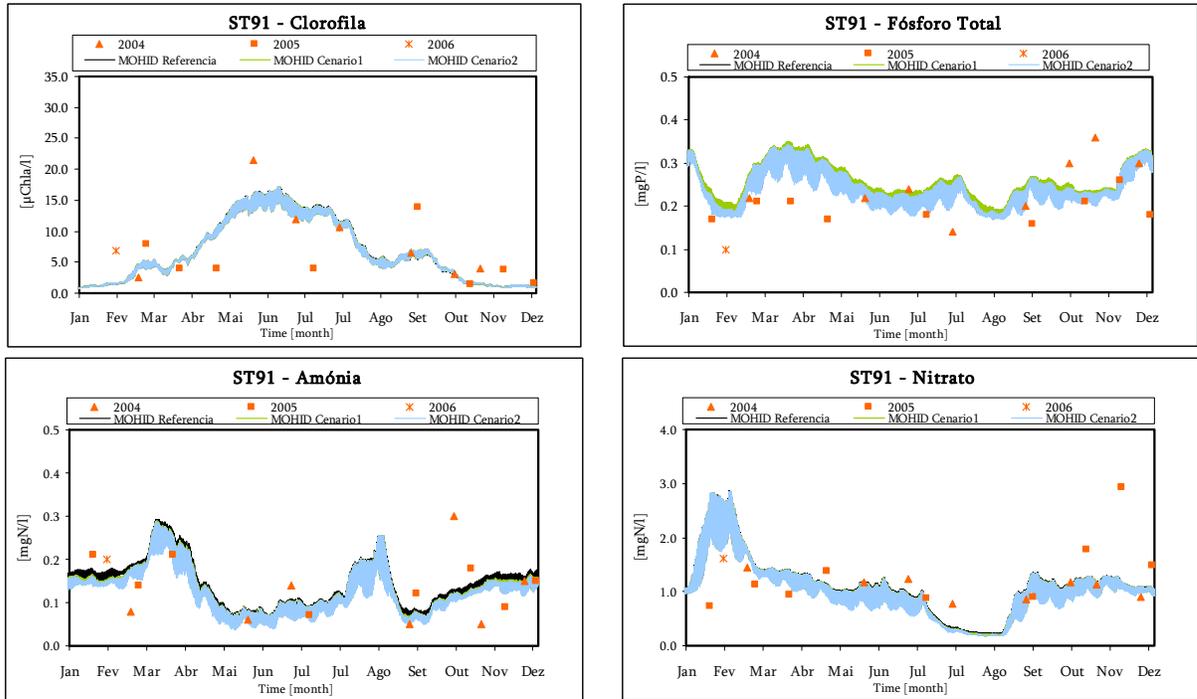


Figura 46. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST91: Situação de Referência vs. Cenário 1 (Licença de Descarga) vs. Cenário 2 (Descarga Nula) vs Dados de Campo.

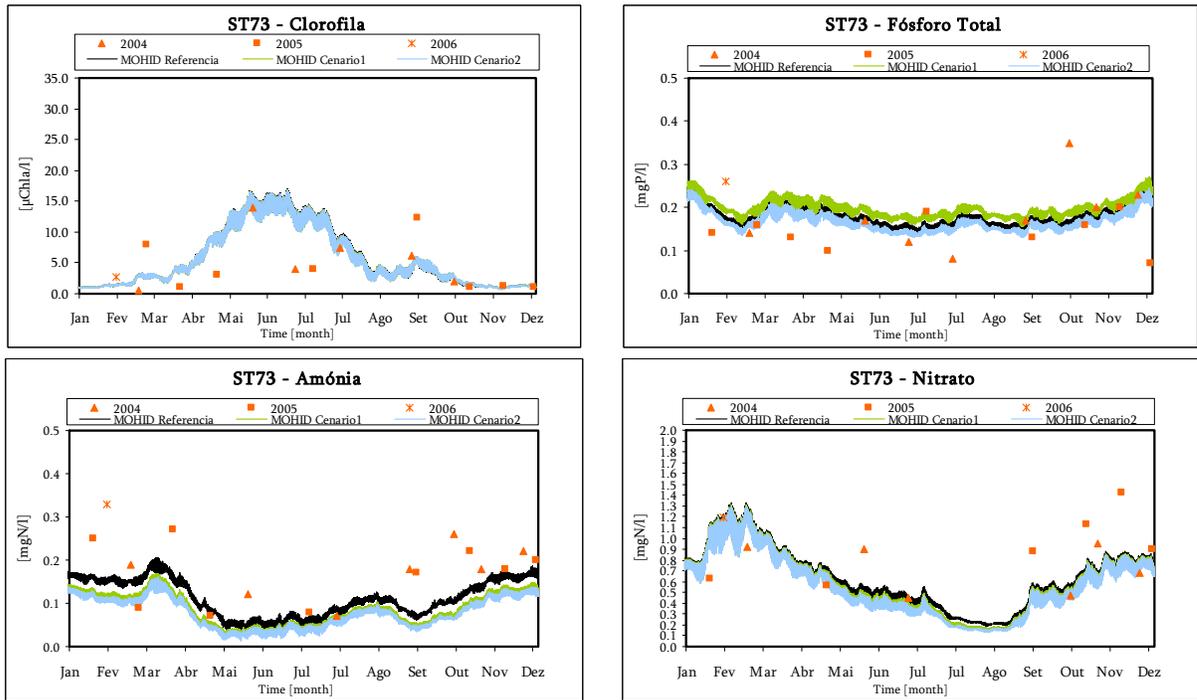


Figura 47. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST73: Situação de Referência vs. Cenário 1 (Licença de Descarga) vs. Cenário 2 (Descarga Nula) vs Dados de Campo.

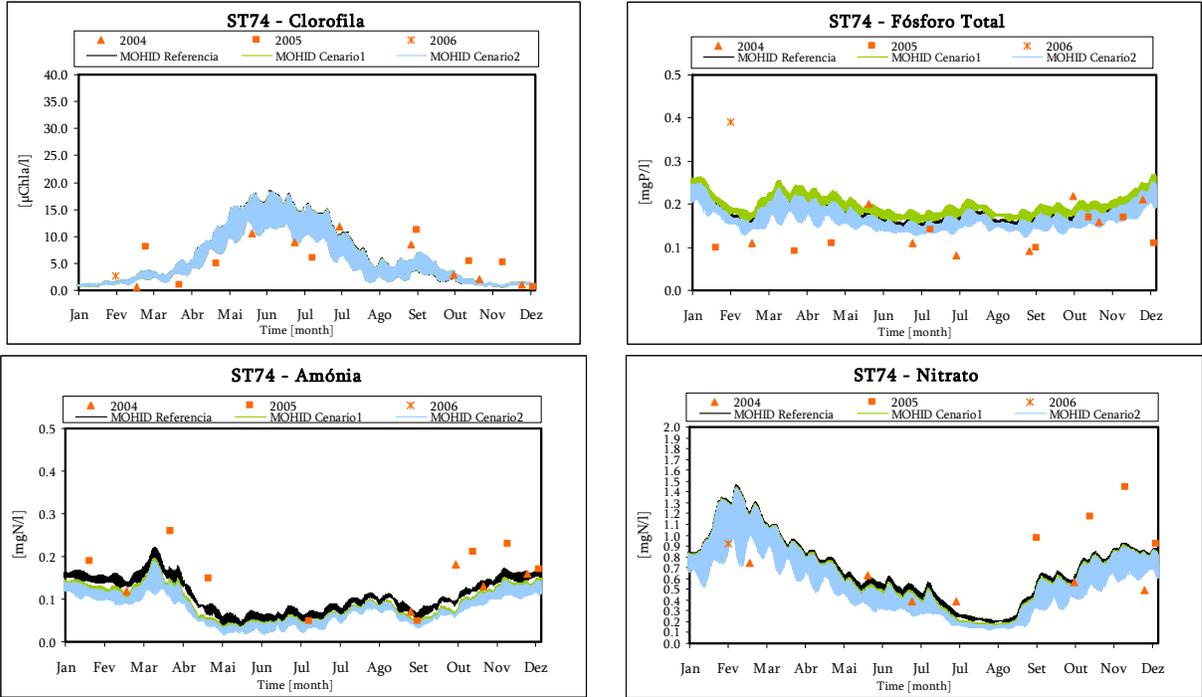


Figura 48. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST74: Situação de Referência vs. Cenário 1 (Licença de Descarga) vs. Cenário 2 (Descarga Nula) vs Dados de Campo.

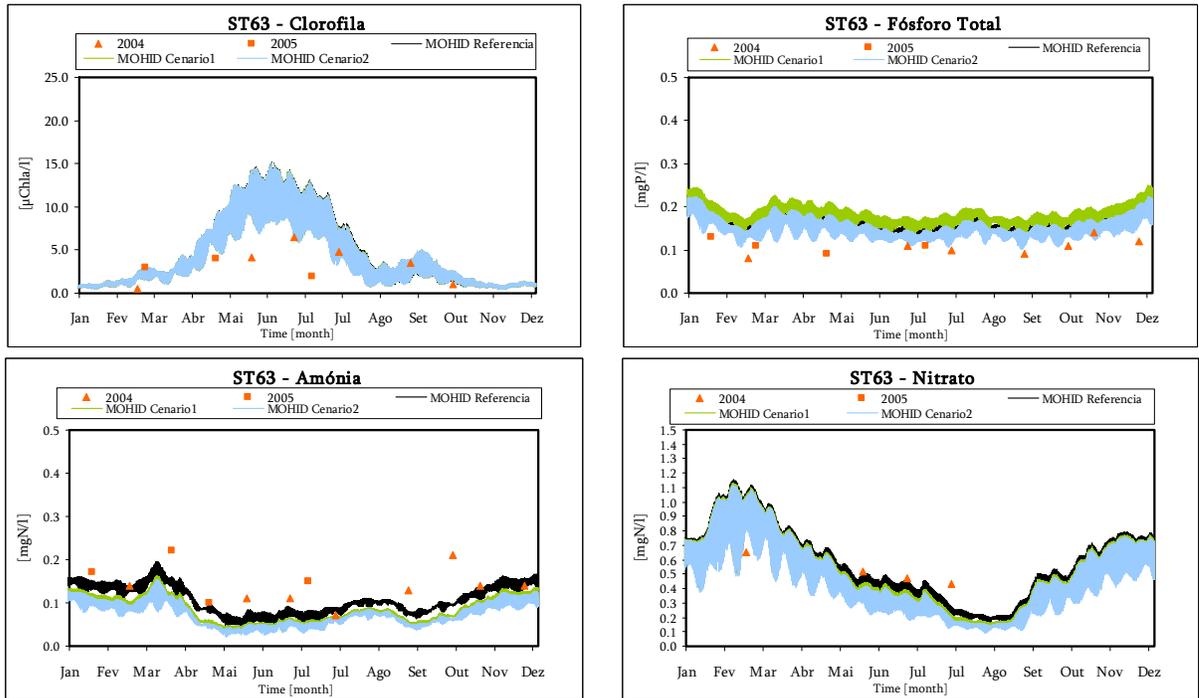


Figura 49. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST63: Situação de Referência vs. Cenário 1 (Licença de Descarga) vs. Cenário 2 (Descarga Nula) vs Dados de Campo.

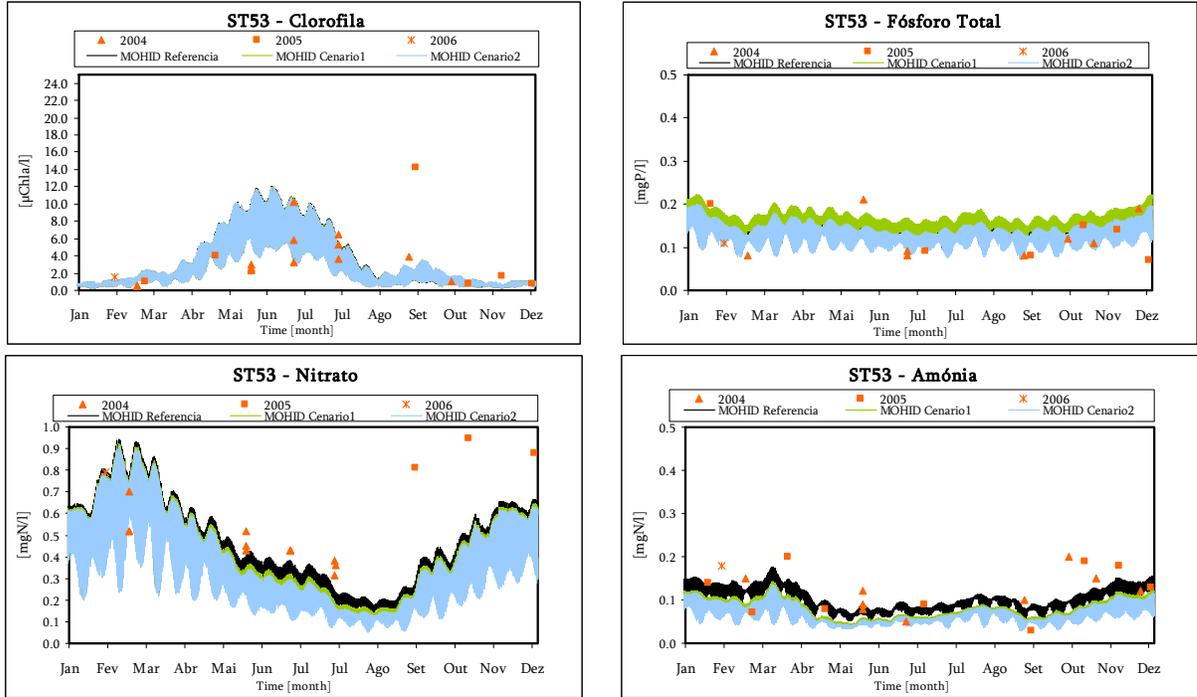


Figura 50. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST53: Situação de Referência vs. Cenário 1 (Licença de Descarga) vs. Cenário 2 (Descarga Nula) vs Dados de Campo.

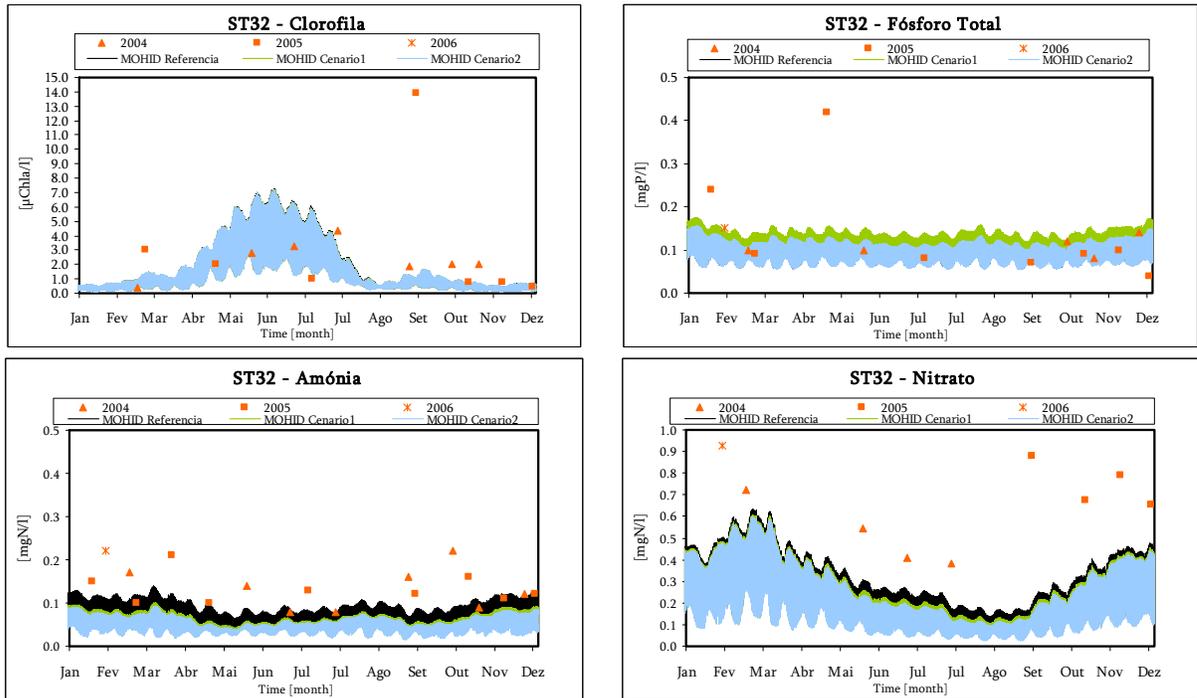


Figura 51. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST32: Situação de Referência vs. Cenário 1 (Licença de Descarga) vs. Cenário 2 (Descarga Nula) vs Dados de Campo.

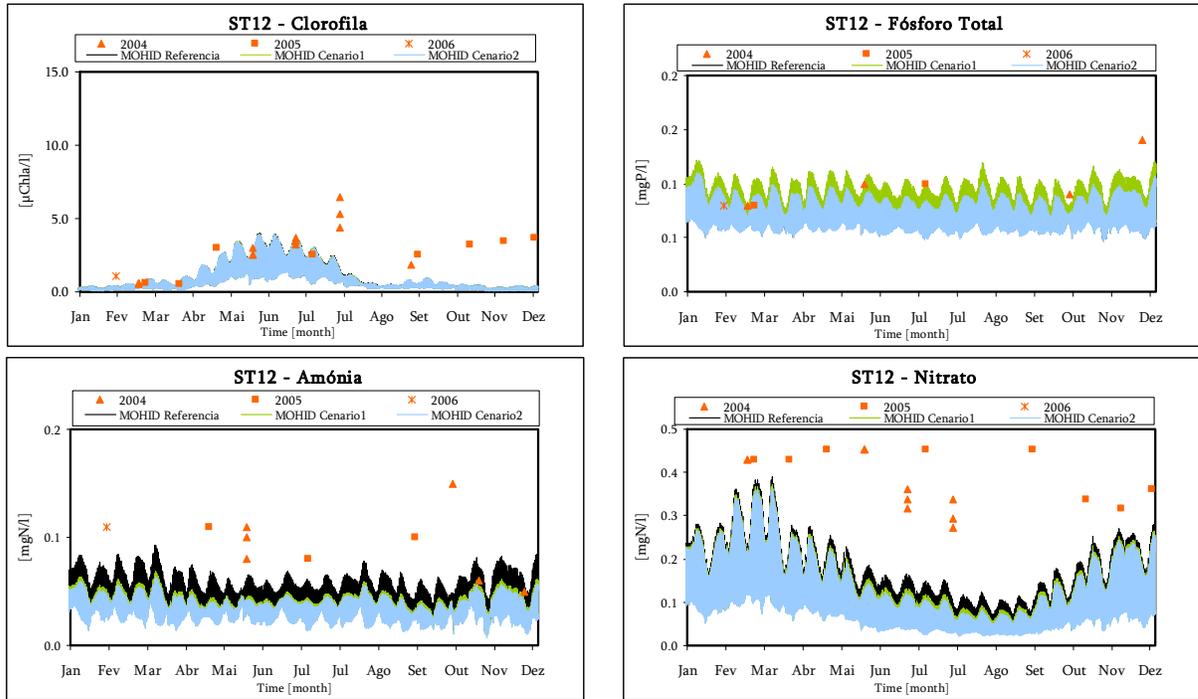


Figura 52. Evolução Sazonal das Propriedades na Estação ST12: Situação de Referência vs. Cenário 1 (Licença de Descarga) vs. Cenário 2 (Descarga Nula) vs Dados de Campo.

### 4.3 Balanço Global das Propriedades

A Figura 53 representa a comparação entre os balanços globais das várias propriedades no estuário, nos três cenários em estudo.

Através da figura verifica-se que a redução de input de nutrientes nos dois cenários provoca uma redução no fluxo de entrada de nutrientes no estuário, em particular de amónia, tendo como excepção o fósforo inorgânico no Cenário 1 (Licença de Descarga) que apresenta maior fluxo de entrada em consequência da imposição de um valor mais elevado que o valor actual emitido pelas ETAR. A redução geral do input das propriedades provoca no entanto um aumento no fluxo de saída do estuário, não se reflectindo em diferenças significativas na produção primária no interior do estuário. A Tabela 14 resume os valores encontrados em termos de produção de fitoplâncton no interior do estuário.

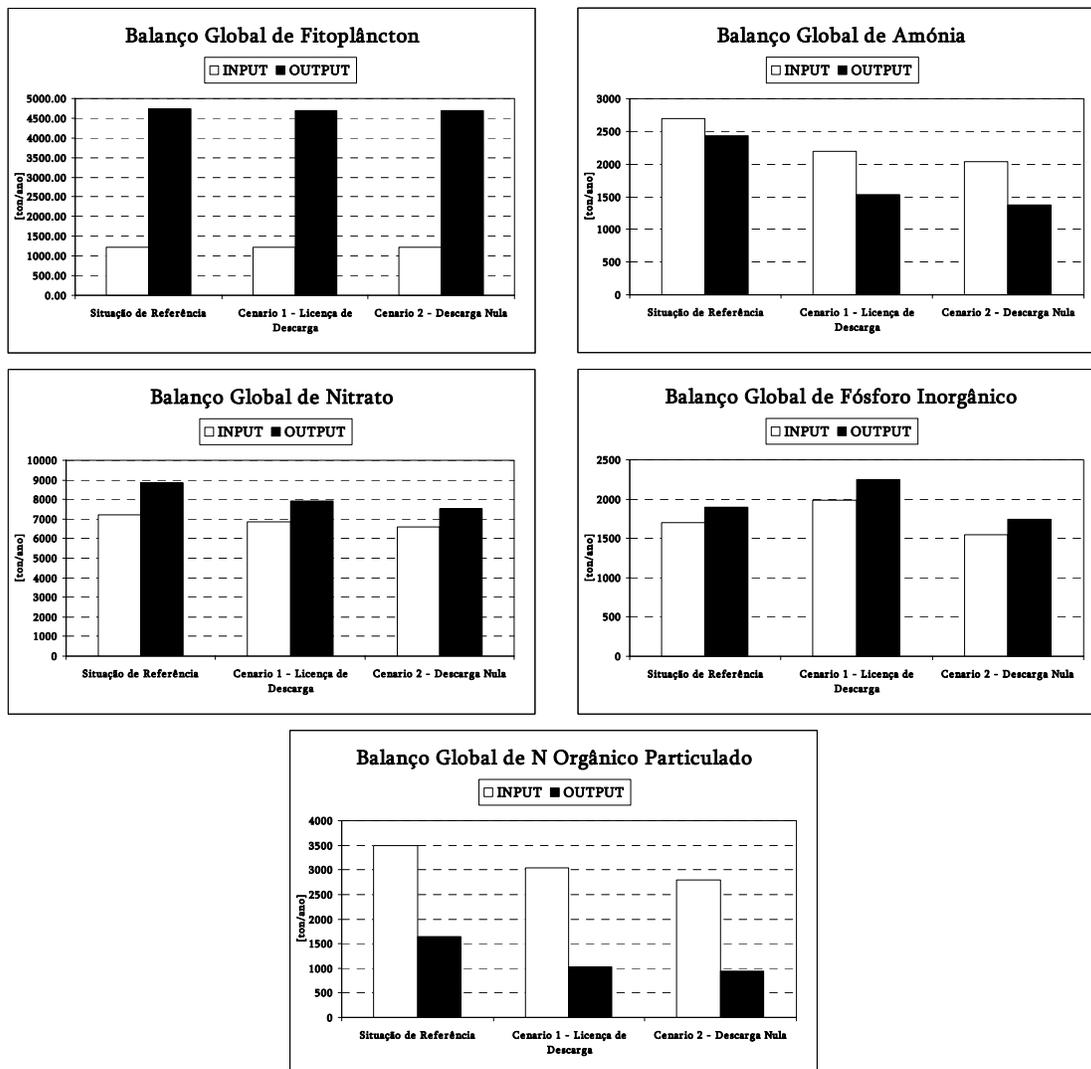


Figura 53. Balço Global das Propriedades no Estuário: comparação de cenários.

Tabela 14. Influência da redução de nutrientes na produção de Fitoplâncton no Estuário do Tejo: diferenças relativas dos cenários face à Situação de Referência.

	Diferença relativa face à situação de referência			Influência na Produção de Fitoplâncton
	INPUT de Amónia	INPUT de Nitrato	INPUT de Fósforo Inorgânico	
Cenário 1 - Licença de Descarga	-19%	-5%	17%	-1%
Cenário 2 - Descarga Nula	-25%	-9%	-9%	-1%

## V. Conclusões

A qualidade da água no Estuário do Tejo surge como a combinação e interligação de dois tipos de processos: (i) processos físicos que resultam da existência de descargas importantes de água doce e de um efeito da maré importante que balança as trocas entre a descarga dos rios e as trocas com o oceano; (ii) processos químicos/biológicos que são intensos em alguns períodos do ano. A aplicação do modelo matemático para reproduzir o ano de 2005 revela resultados bastante concordantes com a generalidade dos dados de campo e permite ainda um complemento importante na análise da variabilidade das propriedades, contribuindo para a compreensão dos principais processos existentes no sistema. Os resultados do modelo confirmam que o Estuário do Tejo é no fundo um grande sistema de depuração de água. É um sistema produtivo, com produção primária intensa durante a Primavera/Verão, controlada essencialmente pela disponibilidade de luz na coluna de água. A quantidade de nutrientes permanece assim elevada no interior do estuário, apesar de notório um decréscimo da sua concentração durante o período de maior produção. A dinâmica de sedimentos no estuário detém em todo o processo um papel decisivo. A mistura entre água doce e salina, o efeito da maré e também o efeito do vento induz uma ressuspensão de sedimentos importante que torna o Estuário do Tejo turvo, onde a luz penetra com dificuldade na coluna de água, limitando a produção primária. A concentração de sedimentos é, segundo as medidas, modelo e corroborando com hipóteses já descritas na literatura, o principal factor limitante do crescimento dos organismos fotossintéticos.

Os resultados do modelo permitem ainda a distinção entre as diferentes zonas do estuário, de acordo com a sua “funções” no sistema: (i) zonas de baixa profundidade, com tempo de residência elevado e por essa razão com produtividade mais elevadas e onde ocorre mineralização da matéria orgânica e (ii) zonas de hidrodinâmica intensa, tempo de residência baixo ou seja zonas essencialmente de transporte.

O presente estudo tem como principal objectivo a avaliação dos efeitos da remoção de nutrientes pelas ETAR de Alcântara, Chelas, Beirolas e S. João da Talha, no nível trófico do Estuário do Tejo e nesse sentido foram implementados adicionalmente dois cenários distintos: (i) Licença de Descarga e (ii) Descarga Nula. Os cenários diferem apenas na concentração de nutrientes presente nos efluentes das ETAR de Alcântara, Chelas, Beirolas e S. João da Talha. O primeiro cenário corresponde a uma situação em que emitidas as propriedades em concentrações que correspondem aos limites de emissão definidos na licença de descarga das estações. Este primeiro cenário corresponde na prática a uma diminuição do *input* nas propriedades Amónia e Nitrato e a um aumento na propriedade Fósforo Inorgânico. O segundo cenário corresponde a uma situação extrema, onde o nível de tratamento realizado na estação é tal que a remoção de nutrientes é

conseguida com uma eficiência de 100%. Os resultados do modelo evidenciam que os efeitos provocados pelas alterações impostas nestes dois cenários são, em termos do nível trófico do sistema, pouco significativos. Ao nível das concentrações de nutrientes no interior do estuário existe globalmente uma diminuição máxima de cerca de 30% nas concentrações de amónia atingidas e inferior a 10% no caso do nitrato e fósforo inorgânico, com uma excepção para o aumento de fósforo inorgânico em cerca de 15% no Cenário 1. No entanto, em termos de fitoplâncton a diferença máxima é de 1%, nos dois cenários, ou seja praticamente desprezável. Este resultado é no fundo uma consequência da dinâmica de produção primária no Estuário do Tejo que, sendo limitada pela disponibilidade de luz e não pela concentração de nutrientes, inibe o crescimento do fitoplâncton mesmo na presença de maiores concentrações de nutrientes. Esta é uma conclusão que corrobora com estudos anteriormente desenvolvidos (Pina, 2001; Saraiva, 2001; INAG/MARETEC, 2002), utilizando agora novas potencialidades do modelo e também a grande quantidade de dados válidos disponíveis que cobrem praticamente toda a área do estuário. A capacidade do modelo em descrever e prever os principais processos que ocorrem no meio estuarino, em particular no Estuário do Tejo é assim reforçada neste estudo, tornando-o numa ferramenta útil não só para a análise de diagnóstico do estuário, mas principalmente em termos da complexa gestão do recurso

## Referências Bibliográficas

Braunschweig, F., Chambel, P., Fernandes, L., Pina, P. & Neves, R., 2004. The object oriented design of the integrated modelling system Mohid. Proceedings of the XVth International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR XV), June 13-17, Chapel Hill, NC, USA.

Braunschweig, F., Martins, F., Chambel, P., Neves, R., 2002. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics* 53 (3), 137-145.

Brito, D., 2005. Integração de detecção remota, dados in-situ e modelos numéricos no estudo do transporte de sedimentos no Estuário do Tejo . Monografia apresentada para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 48 pp.

Freire, P., Andrade, C., 1999. Wind-induced sand transport in Tagus estuarine beaches. *Aquatic Ecology* 33, Kluwer Academic Publishers.

INAG (Instituto da Água) /MARETEC, 2002. Water Quality in Portuguese Estuaries: Tejo,Sado and Mondego. Lisboa.

INAG (Instituto da Água) /MARETEC, 2003. Water Quality in Portuguese Estuaries: Douro, Minho, Lima, Ria de Aveiro, Ria Formosa, Guadiana. Lisboa.

INAG (Instituto da Água)/MARETEC, 2001. Definição do limite de Jusante dos estuários portugueses, Lisboa

Leitão, P., 2003. Integração de Escalas e de Processos na Modelação do Ambiente Marinho. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 279 pp.

Metcalf and Eddy, 1991. *Wastewater Engineering–Treatment Disposal Reuse*, Third Edition, McGraw-Hill.

Pina, P., 2001. An Integrated Approach to Study The Tagus Estuary Water Quality. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 70 pp.

Portela, L., 1996. Modelação matemática de processos hidrodinâmicos e de qualidade da água no Estuário do Tejo. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 240 pp

Saraiva, S., 2001. Produção Primária de Biomassa no Estuário do Tejo: Estudo da variabilidade das Descargas. Monografia apresentada ao IST para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia do Ambiente, Lisboa, Portugal.

Saraiva, S., P. Pina, F. Martins, M. Santos, F. Braunschweig & R. Neves. Modelling the influence of nutrient loads on portuguese estuaries. *Hydrobiologia* (*in press*).



# Anexo I

Sistema MOHID: Descrição do Módulo Water Quality

---



## ÍNDICE

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1. Fitoplâncton e Macroalgas</b>	<b>3</b>
<b>2. Zooplâncton</b>	<b>8</b>
<b>3. Azoto</b>	<b>10</b>
3.1. Amónia	10
3.2. Nitrato	11
3.3. Nitrito	12
3.4. Azoto Orgânico Particulado	12
3.5. Azoto Orgânico Dissolvido Não Refractário	13
3.6. Azoto Orgânico Dissolvido Refractário	14



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I. 1. Processos relacionados com o fitoplâncton e macroalgas.....	3
Figura I. 2. Processos relacionados com o zooplâncton.....	8
Figura I. 3. Processos relacionados com Amónia.....	10
Figura I. 4. Processos relacionados com Nitrato.....	11
Figura I. 5. Processos relacionados com Nitrito.....	12
Figura I. 6. Processos relacionados com Azoto Orgânico Particulado (PON).....	12
Figura I. 7. Processos relacionados com Azoto Orgânico Dissolvido Não Refractário.....	13
Figura I. 8. Processos relacionados com Azoto Orgânico Dissolvido Refractário.....	14

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I. 1. Termos da equação de variação de biomassa dos produtores primários de biomassa: designação e determinação.....	4
Tabela I. 2. Factores Limitantes e termos necessários para o seu cálculo: Nutrientes.....	4
Tabela I. 3. Factores Limitantes e termos necessários para o seu cálculo: Luz.....	4
Tabela I. 4. Factores Limitantes e termos necessários para o seu cálculo: Temperatura.....	5
Tabela I. 5. Valores standard para os parâmetros referentes ao fitoplâncton.....	6
Tabela I. 6. Valores standard para os parâmetros referentes a macroalgas.....	7
Tabela I. 7. Termos da equação de variação de biomassa do Zooplâncton: designação e determinação.....	9
Tabela I. 8. Valores standard para os parâmetros referentes ao zooplâncton.....	9
Tabela I. 9. Termos da equação de variação de biomassa das espécies de Azoto: designação e determinação.....	14
Tabela I. 10. Valores standard para os parâmetros referentes ao azoto.....	15



# INTRODUÇÃO

---

Apresentam-se, neste anexo, de uma forma sintética, os principais pressupostos e considerações assumidas na construção do modelo ecológico do Sistema MOHID, evidenciando as equações e parâmetros utilizados na descrição dos processos biológicos. Mais detalhes da construção, organização e aplicações do Sistema MOHID poderão ser encontrados em [www.mohid.com](http://www.mohid.com).

Em termos gerais, neste modelo, considera-se que os produtores primários (fitoplâncton e macroalgas) consomem nutrientes inorgânicos e dependem da sua disponibilidade, bem como da quantidade de luz, para obterem energia suficiente para o seu desenvolvimento, através da fotossíntese. Assume-se que: o Azoto é o principal nutriente limitante para o crescimento destes seres (a simulação de limitação pelo fósforo é possível com o Sistema MOHID, mas não será apresentado, por não ter sido considerada neste estudo); o Azoto é consumido apenas nas formas de Amónia e/ou Nitrato; as excreções dos organismos funcionam como uma fonte do ciclo do Azoto; os produtores primários são consumidos pelos secundários e estes, por sua vez, consumidos pelos níveis tróficos seguintes.



## 1. Fitoplâncton e Macroalgas

O modelo assume que a taxa de crescimento de um ser fotossintético  $p$  (fitoplâncton ou macroalgas),  $\mu_p$ , depende, fundamentalmente de três tipos de limitação: temperatura, luz e concentração de nutrientes. Por forma a quantificar esta mesma limitação surgem, respectivamente, os chamados factores limitantes,  $\Psi(T)$ ,  $\Psi(E)$ ,  $\Psi(N)$ , tendo valor 1 quando não existe limitação do crescimento e 0 quando esta é máxima. A Figura I. 1 representa, de uma forma esquemática, os processos descritos pelo modelo, envolvendo, quer o fitoplâncton, quer as macroalgas.

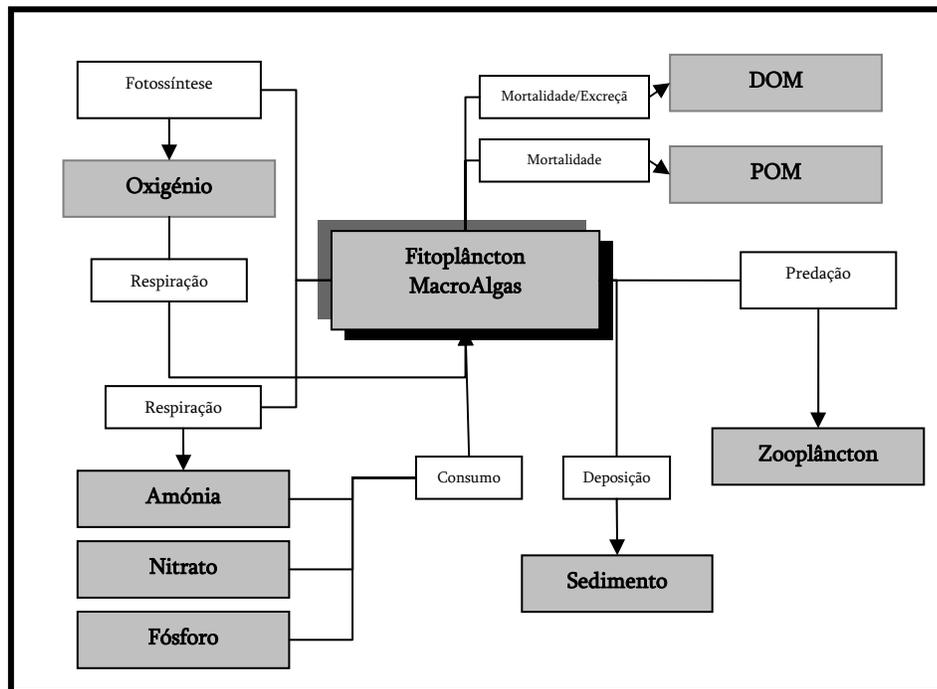


Figura I. 1. Processos relacionados com o fitoplâncton e macroalgas.

O termo referente ao balanço entre fontes e poços, considerado pelo modelo, para a variação de concentração de cada um dos produtores primários de biomassa (fitoplâncton e macroalgas), no estuário, é descrito pela Eq. 1, onde  $\Phi_p$  representa a concentração. No caso do fitoplâncton,  $\Phi_{phy}$  é descrito em termos de mg C/l e para as macroalgas  $\Phi_{MA}$  representa kg C/m<sup>2</sup>, o mesmo se aplica à concentração de nutrientes no meio, representado nas equações como  $\Phi_p$ . Nas tabelas

seguintes, estão descritos os termos que compõem a equação e os valores standard considerados para o seu cálculo. A variável P representa em muitas equações a propriedade fitoplâncton e a propriedade macroalga, quando a mesma equação é aplicável aos dois tipos de produtores primários.

$$\text{Eq. 1} \quad (F - P)^p = (\mu^p - r^p - ex^p - m^p) \times \Phi_p - G^p$$

Tabela I. 1. Termos da equação de variação de biomassa dos produtores primários de biomassa: designação e determinação.

Termo	Símbolo	Unidade	Equação
Taxa de Crescimento	$\mu^p$	$d^{-1}$	$\mu^p = \mu_{\max}^p \min[\psi(N)^p, \psi(P)^p] \psi(E)^p \psi(T)^p$
Taxa de Respiração	$r^p$	$d^{-1}$	$r^p = k_{re}^p e^{(0.069T)} + k_{rp}^p \mu^p$
Taxa de Excreção	$ex^p$	$d^{-1}$	$ex^p = \varepsilon^p \mu^p (1 - \psi(E)^p)$
Taxa de Mortalidade (Natural)	$m^p$	$d^{-1}$	$m^p = m_{\max}^p \frac{\frac{\Phi_p}{\mu^p}}{K_m^p + \frac{\Phi_p}{\mu^p}}$
Taxa de Mortalidade (Predação)	$G^p$	$d^{-1}$	<p><b>Fitoplâncton:</b> <math>G^{phy} = \frac{\mu^{zoo}}{E} \Phi_{zoo}</math>, onde <math>\Phi_{zoo}</math> representa a concentração de Zooplâncton e <math>E</math> a eficiência de assimilação;</p> <p><b>MacroAlgas:</b> Considera-se um valor constante, <math>G^{MA}</math></p>

Tabela I. 2. Factores Limitantes e termos necessários para o seu cálculo: Nutrientes.

Nutrientes			
Símbolo	Designação	Unidades	Equação
$\Psi(N)^p$	Factor de Limitação (Azoto)	-	$\Psi(N)^p = \frac{\Phi_{NH_4} + \Phi_{NO_3}}{K_N^p + \Phi_{NH_4} + \Phi_{NO_3}}$
$\Phi_{NH_4}$	Amónia	mg N.l <sup>-1</sup>	
$\Phi_{NO_3}$	Nitrato	mg N.l <sup>-1</sup>	
$\Psi(P)^p$	Factor de Limitação (Fósforo)	-	$\Psi(P)^p = \frac{\Phi_{PO_4}}{K_P^p + \Phi_{PO_4}}$
$\Phi_{PO_4}$	Fosfato	mg P.l <sup>-1</sup>	

Tabela I. 3. Factores Limitantes e termos necessários para o seu cálculo: Luz.

Luz			
Símbolo	Designação	Unidades	Equação
$\Psi(E)^p$	Factor de Limitação pela Luz	-	$\Psi(E)^p = \frac{e^1}{k^p \cdot z} \cdot \left( e^{-\frac{E_0}{E_{sp}^p} \cdot e^{(-k^p \cdot z)}} - e^{-\frac{E_0}{E_{sp}^p}} \right)$
$E_0$	Radiação Solar Efectiva na Superfície da Água	Wm <sup>2</sup>	a
$k^p$	Factor de Extinção da Luz na Água	m <sup>-1</sup>	$k^{phy} = 0.04 + 0.0088\Phi_{phy} + 0.054\Phi_{phy}^{2/3} + 0.036\Phi_{ss}$  $k^{MA} = \frac{\alpha_{abs}^{MA} \Phi_{MA}}{Min(h^{MA}, h^{WC})} \times Max\left(\frac{h^{MA}}{h^{WC}}, 1\right)$
$\Phi_{ss}$	Concentração de Sólidos em Suspensão	mg l <sup>-1</sup>	
$z$	Profundidade	m	

Tabela I. 4. Factores Limitantes e termos necessários para o seu cálculo: Temperatura.

Temperatura			
Símbolo	Designação	Unidades	Equação
$\Psi(T)^p$	Factor de Limitação pela Temperatura	-	$\psi(T)^p = K_A(T)K_B(T)$
$K_A(T)^p$		-	$K_A(T)^p = \frac{K_1^p \cdot e^{\gamma_1^p (T - T_{min}^p)}}{1 + K_1^p \cdot \left( e^{\gamma_1^p (T - T_{min}^p)} - 1 \right)}$
$K_B(T)^p$		-	$K_B(T)^p = \frac{K_4^p \cdot e^{\gamma_2^p (T_{max}^p - T)}}{1 + K_4^p \cdot \left( e^{\gamma_2^p (T_{max}^p - T)} - 1 \right)}$
$\gamma_1^p$		-	$\gamma_1^p = \frac{Ln \frac{K_2^p (1 - K_1^p)}{K_1^p (1 - K_2^p)}}{T_{opt,min}^p - T_{min}^p}$
$\gamma_2^p$		-	$\gamma_2^p = \frac{Ln \frac{K_3^p (1 - K_4^p)}{K_4^p (1 - K_3^p)}}{T_{max}^p - T_{min}^p}$

<sup>a</sup> Não são descritas as equações que permitem calcular a Radiação Solar Efectiva na superfície da água por se entender que, não sendo fundamentais para a compreensão do estudo efectuado, poderiam sobrecarregar esta tese. As equações podem ser consultadas em Pina (2001).

**Tabela I. 5.** Parâmetros utilizados na simulação de fitoplâncton (adaptado de Pina, 2001).

<b>Símbolo</b>	<b>Designação</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
$\mu_{\max}^{phy}$	Taxa de Crescimento Máxima	d <sup>-1</sup>	2,2
$k_{re}^{phy}$	Constante de Respiração Endógena	d <sup>-1</sup>	0,0175
$k_{rp}^{phy}$	Constante de Fotorespiração	d <sup>-1</sup>	0,125
$\varepsilon^{phy}$	Constante de Excreção	-	0,07
$m_{\max}^{phy}$	Taxa de Mortalidade Máxima	d <sup>-1</sup>	0,02
$K_m^{phy}$	Constante de Semi-Saturação de Mortalidade	mg C l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	0,3
$E$	Eficiência de Assimilação	-	0,6
$K_N^{phy}$	Constante de Semi-Saturação de Azoto	mg N l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	0,014
$E_{opt}^{phy}$	Intensidade Ótima de Luz para a Fotossíntese	Wm <sup>-2</sup>	90
$T_{opt_{\min}}^{phy}$	Temperatura Ótima Mínima para a Fotossíntese	°C	25,0
$T_{opt_{\max}}^{phy}$	Temperatura Ótima Máxima para a Fotossíntese	°C	26,5
$T_{\min}^{phy}$	Temperatura Mínima para a Fotossíntese	°C	4,0
$T_{\max}^{phy}$	Temperatura Máxima para a Fotossíntese	°C	37,0
$K_1^{phy}$	Constante para a Curva de efeito da Temperatura	-	0.3
$K_2^{phy}$	Constante para a Curva de efeito da Temperatura	-	0.98
$K_3^{phy}$	Constante para a Curva de efeito da Temperatura	-	0.98
$K_4^{phy}$	Constante para a Curva de efeito da Temperatura	-	0.01
$\alpha^{phy}$	Fracção N/C no organismo	-	0,18
$f_{inorg}^{phy}$	Fracção Inorgânica das Excreções	-	0,4
$f_{orgD}^{phy}$	Fracção Orgânica Dissolvida das Excreções	-	0,5

Tabela I. 6. Parâmetros utilizados na simulação de macroalgas. (adaptado de Trancoso, 2002)

Símbolo	Designação	Unidade	Valor
$\mu_{\max}^{MA}$	Taxa de Crescimento Máxima	d <sup>-1</sup>	0,4
$k_{re}^{MA}$	Constante de Respiração Endógena	d <sup>-1</sup>	0,00175
$k_{rp}^{MA}$	Constante de Fotorespiração	d <sup>-1</sup>	0,018
$\varepsilon^{MA}$	Constante de Excreção	-	0,008
$m_{\max}^{MA}$	Taxa de Mortalidade Máxima	d <sup>-1</sup>	0,003
$K_m^{MA}$	Constante de Semi-Saturação de Mortalidade	kg C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	0,03
$G^{MA}$	Taxa de Predação das Macroalgas	d <sup>-1</sup>	0,0008
$K_N^{MA}$	Constante de Semi-Saturação de Azoto	mg N l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	0,065
$E_{opt}^{MA}$	Intensidade Ótima de Luz para a Fotossíntese	Wm <sup>2</sup>	90
$T_{opt_{\min}}^{MA}$	Temperatura Ótima Mínima para a Fotossíntese	°C	12
$T_{opt_{\max}}^{MA}$	Temperatura Ótima Máxima para a Fotossíntese	°C	24
$T_{\min}^{MA}$	Temperatura Mínima para a Fotossíntese	°C	6
$T_{\max}^{MA}$	Temperatura Máxima para a Fotossíntese	°C	37
$K_1^{MA}$	Constante para a Curva de efeito da Temperatura	-	0,3
$K_2^{MA}$	Constante para a Curva de efeito da Temperatura	-	0,98
$K_3^{MA}$	Constante para a Curva de efeito da Temperatura	-	0,98
$K_4^{MA}$	Constante para a Curva de efeito da Temperatura	-	0,01
$\alpha^{MA}$	Fracção N/C no organismo	-	0,18
$f_{inorg}^{MA}$	Fracção Inorgânica das Excreções	-	0,25
$f_{orgD}^{MA}$	Fracção Orgânica Dissolvida das Excreções	-	0,25
$K_{NutReg}^{phy}$	Metade da Constantes de Saturação para a Regeneração dos Nutrientes	mg N.l <sup>-1</sup>	1,0
$a_{abs}^{MA}$	Área de Absorção das Macroalgas	m <sup>2</sup> kg C <sup>-1</sup>	5,55
$h^{MA}$	Altura da MacroAlgas	m	0,2
$F_{dep_{\max}}^{MA}$	Taxa de deposição de sedimentos máximo tolerável para o crescimento de Macroalgas	Kg.m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	0,005
$\tau_{ero}^{*MA}$	Tensão de Corte crítica de erosão a partir da qual surge a “quebra” de macroalgas	Pa	1

## 2. Zooplâncton

A variação da concentração de fitoplâncton depende, em grande parte, da concentração de Zooplâncton existente no meio, uma vez que se trata do seu principal predador. O modelo inclui uma série de equações com o objectivo de descrever a actividade biológica do Zooplâncton que, por sua vez, depende também do Fitoplâncton existente. Apresentam-se, de seguida, as equações consideradas para estabelecer o balanço entre as fontes e poços correspondentes ao Zooplâncton e uma figura com a representação esquemática dos processos em que se encontra envolvido.

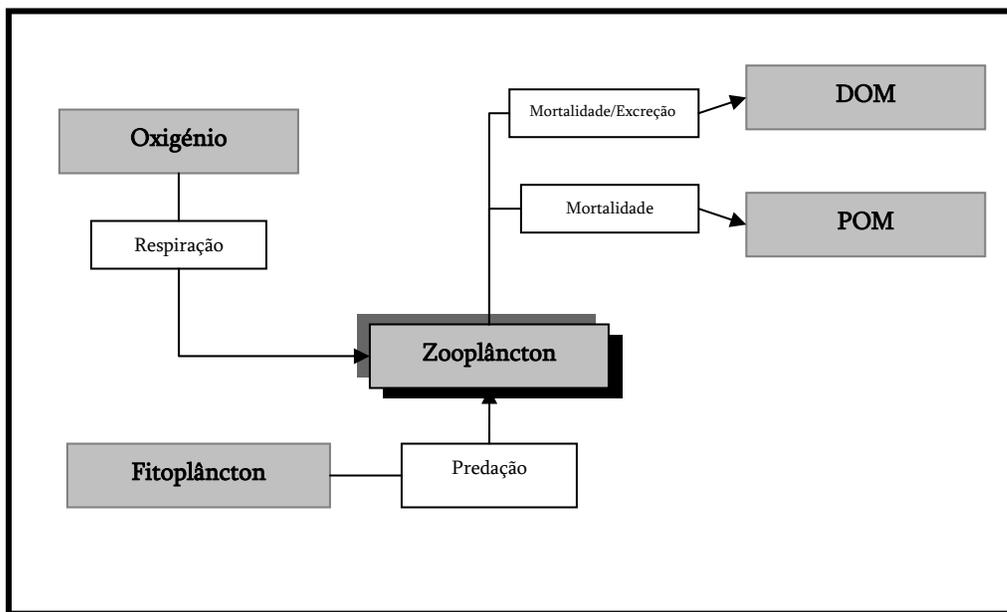


Figura I. 2. Processos relacionados com o zooplâncton.

$$\text{Eq. 2} \quad (F - P)_{zoo} = (\mu^{zoo} - r^{zoo} - ex^{zoo} - m^{zoo}) \times \Phi_{zoo} - G^{zoo}$$

Tabela I. 7. Termos da equação de variação de biomassa do Zooplâncton: designação e determinação.

Termo	Símbolo	Unidade	Equação
Taxa de Crescimento	$\mu^{zoo}$	d <sup>-1</sup>	$\mu^{zoo} = \begin{cases} \mu_{\max}^{zoo} \Psi(T)^{zoo} \left(1 - e^{-\Lambda(\Phi_{phy} - \Phi_{\min,phy}^{zoo})}\right) \\ 0 \text{ para } \Phi_{phy} < \Phi_{\min,phy}^{zoo} \end{cases}$
Taxa de Mortalidade Natural e Respiração	$r^{zoo} + m^{zoo}$	d <sup>-1</sup>	$r^{zoo} + m^{zoo} = d^{zoo} \Psi(T)^{zoo}$
Taxa de Mortalidade por Predação	$G^{zoo}$	mg C l <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	$G^{zoo} = e^{zoo} \Phi_{Zoo}$

Tabela I. 8. Parâmetros utilizados na simulação de zooplâncton (adaptado de Pina, 2001).

Símbolo	Designação	Unidade	Valor
$\mu_{\max}^{zoo}$	Taxa de crescimento Máxima	d <sup>-1</sup>	0,1
$\Lambda$	Constante de Ivlev	-	13,0
$\Phi_{\min,phy}^{zoo}$	Concentração Mínima de Fitoplâncton para a Predação	mgC/L	0,0045
$d^{zoo}$	Constante de Mortalidade Natural e de Respiração	d <sup>-1</sup>	0,036
$e^{zoo}$	Constante de Mortalidade por Predação	d <sup>-1</sup>	0,01
$T_{opt,\min}^{zoo}$	Temperatura Ótima Mínima para o Crescimento	°C	24,8
$T_{opt,\max}^{zoo}$	Temperatura Ótima Máxima para o Crescimento	°C	25,1
$T_{\min}^{zoo}$	Temperatura Mínima para a para o Crescimento	°C	5,0
$T_{\max}^{zoo}$	Temperatura Máxima para a para o Crescimento	°C	35,0
$\alpha^{zoo}$	Fracção N/C no organismo	-	0,24
$f_{inorg}^{zoo}$	Fracção Inorgânica das Excreções	-	0,25
$f_{orgD}^{zoo}$	Fracção Orgânica Dissolvida das Excreções	-	0,25

### 3. Azoto

Assume-se, no modelo, que o Azoto pode, de uma maneira geral, encontrar-se em três formas distintas: Azoto Orgânico (Dissolvido, DON, e Particulado, PON), Amónia ( $\text{NH}_4^+$ ) e Azoto Inorgânico (Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e Nitrito ( $\text{NO}_2^-$ )). O Azoto Orgânico Dissolvido pode, ainda, subdividir-se em Não Refractário (DONnr), que representa os compostos que se considera serem degradados até ao final do dia em que foram produzidos, e Refractário (DONre), cujo tempo de permanência em solução é superior a um dia.

As equações e parâmetros apresentados nas secções seguintes são utilizadas pelo modelo para descrever, de uma forma aproximada e recorrendo a algumas simplificações, os inúmeros e complexos processos que constituem o ciclo do Azoto. Apresentam-se ainda alguns esquemas simplificados destes mesmos processos relacionados com cada uma das propriedades em estudo.

#### 3.1. Amónia

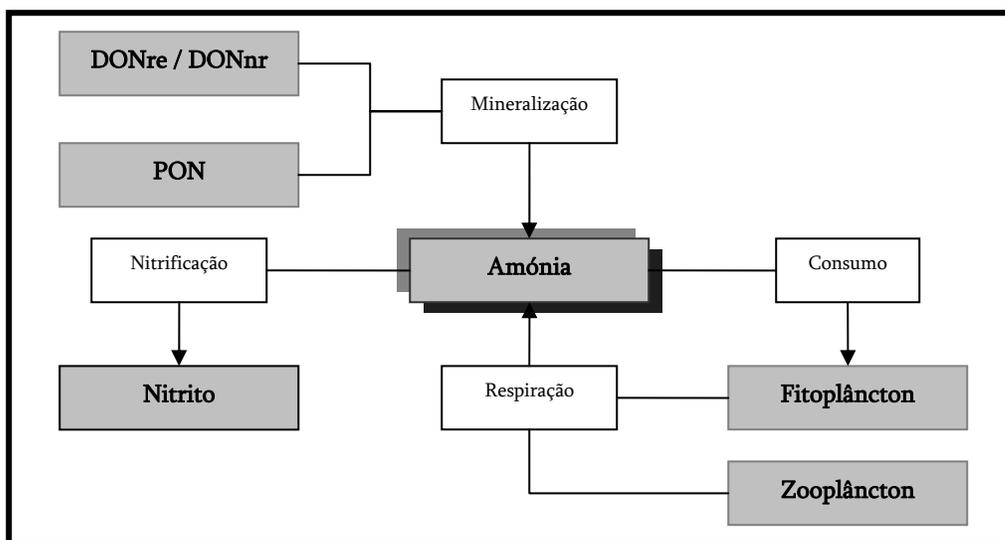


Figura I. 3. Processos relacionados com Amónia.

$$\begin{aligned}
 \text{Eq. 3} \quad \frac{\partial \Phi_{NH_4}}{\partial t} = & \underbrace{\left[ f_{inor}^{phy} (ex^{phy} + r^{phy}) \alpha^{phy} - \beta_{NH_4}^{phy} \mu^{phy} \alpha^{phy} \right]}_{\text{phytoplankton}} \Phi_{phy} + \\
 & + \underbrace{\left[ f_{inorg}^{MA} (ex^{MA} + r^{MA} + G^{MA}) \alpha^{MA} - \beta_{NH_4}^{MA} \mu^{MA} \alpha^{MA} \right]}_{\text{macroalgae}} \frac{\Phi_{MA}}{h} \times 10^3 + \\
 & + \underbrace{\left[ f_{inorg}^{zoo} (ex^{zoo} + r^{zoo} + m^{zoo}) \alpha^{zoo} \right]}_{\text{zooplankton}} \Phi_{zoo} + \underbrace{K_{min}^{DONre}}_{\text{DONre}} \Phi_{DONre} + \\
 & + \underbrace{f_{orgP} K_{dec}^{PON}}_{\text{PON}} \Phi_{PON} + \underbrace{K_{min}^{DONnr}}_{\text{DONnr}} \Phi_{DONnr} - \underbrace{K_{nit}}_{\text{nitrification step1}} \Phi_{NH_4}
 \end{aligned}$$

### 3.2. Nitrato

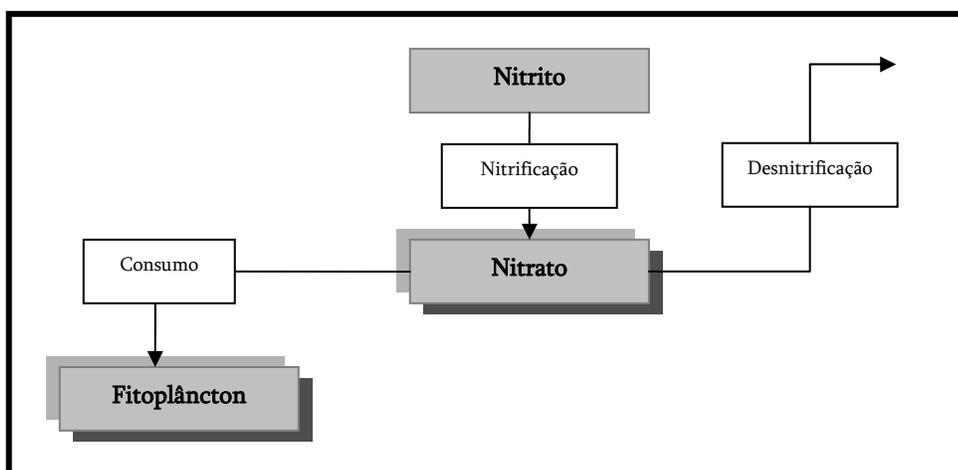


Figura I. 4. Processos relacionados com Nitrato.

$$\text{Eq. 4} \quad \frac{\partial \Phi_{NO_3}}{\partial t} = - \underbrace{(1 - \beta_{NH_4}^{phy}) \alpha^{phy} \mu^{phy} \Phi_{phy}}_{\text{phytoplankton}} - \underbrace{(1 - \beta_{NH_4}^{MA}) \alpha^{MA} \mu^{MA} \frac{\Phi_{MA}}{h}}_{\text{macroalgae}} \times 10^3 + K_{nit} \Phi_{NO_2} - K_{dnt} \Phi_{NO_3}$$

### 3.3. Nitrito

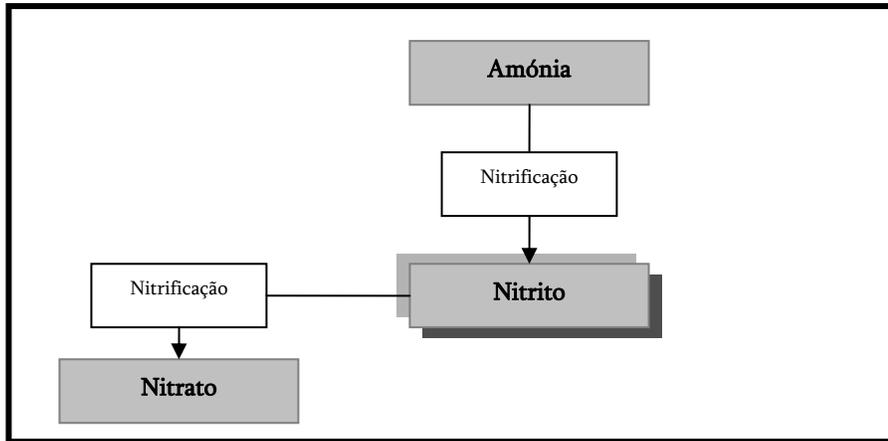


Figura I. 5. Processos relacionados com Nitrito.

Eq. 5 
$$\frac{\partial \Phi_{NO_2}}{\partial t} = K_{nit} \Phi_{NH_4} - K_{nit} \Phi_{NO_2}$$

### 3.4. Azoto Orgânico Particulado

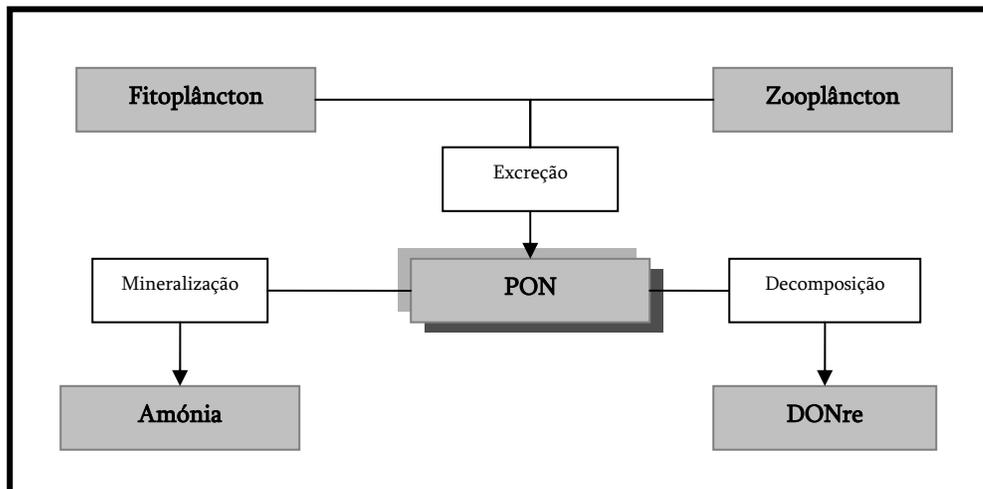


Figura I. 6. Processos relacionados com Azoto Orgânico Particulado (PON).

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Phi_{PON}}{\partial t} = & \underbrace{\left[ (1 - f_{inorg}^{phy})(1 - f_{orgD}^{phy})ex^{phy} + m^{phy} \right]}_{\text{phytoplankton}} \alpha^{phy} \Phi_{phy} + \\
 & + \underbrace{\left[ (1 - f_{inorg}^{MA})(1 - f_{orgD}^{phy})(ex^{MA} + G^{MA}) + m^{MA} \right]}_{\text{macroalgae}} \alpha^{MA} \frac{\Phi_{MA}}{h} \times 10^3 + \\
 \text{Eq. 6} \quad & + \underbrace{(1 - f_{inorg}^{zoo})(1 - f_{orgD}^{zoo})(ex_{zoo} + G_{zoo}) + m_{zoo}}_{\text{mesozooplankton}} \alpha^{zoo} \Phi_{zoo} + \delta_N^{phy} \Phi_{zoo} - \\
 & - \underbrace{(1 - f_{orgP})K_{dec}^{PON}}_{\text{DONre}} \Phi_{PON} - \underbrace{f_{orgP}K_{dec}^{PON}}_{\text{ammonia}} \Phi_{PON}
 \end{aligned}$$

### 3.5. Azoto Orgânico Dissolvido Não Refractário

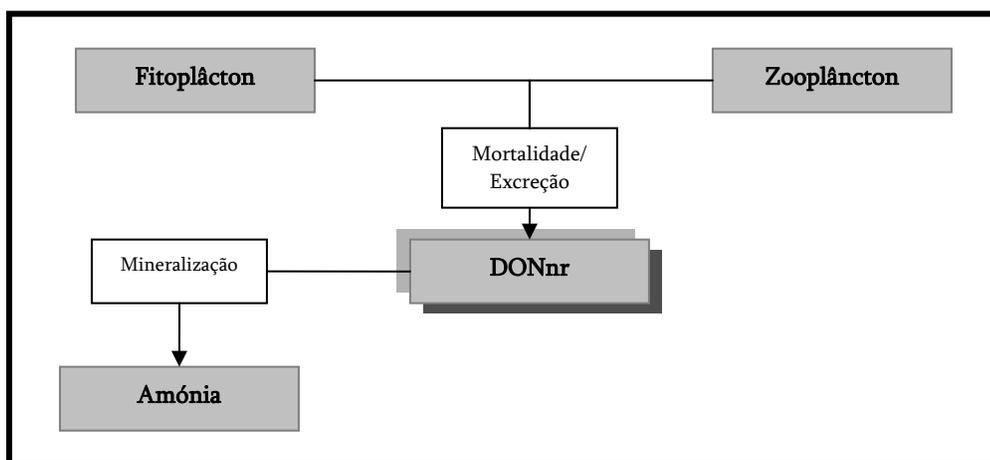


Figura I. 7. Processos relacionados com Azoto Orgânico Dissolvido Não Refractário.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Phi_{DONnr}}{\partial t} = & \underbrace{(1 - f_{inorg}^{phy})f_{orgD}^{phy}(ex^{phy} + r^{phy})}_{\text{phytoplankton}} \alpha^{phy} \Phi_{phy} + \\
 & + \underbrace{(1 - f_{inorg}^{MA})f_{orgD}^{MA}(ex^{MA} + r^{MA} + G_{MA})}_{\text{macroalgae}} \alpha^{MA} \frac{\Phi_{MA}}{h} \times 10^3 + \\
 \text{Eq. 7} \quad & + \underbrace{(1 - f_{inorg}^{zoo})f_{orgD}^{zoo}(ex_{zoo} + r_{zoo} + G_{zoo})}_{\text{zooplankton}} \alpha^{zoo} \Phi_{zoo} - \underbrace{K_{min}^{DONnr}}_{\text{ammonia}} \Phi_{DONnr}
 \end{aligned}$$

### 3.6. Azoto Orgânico Dissolvido Refractário

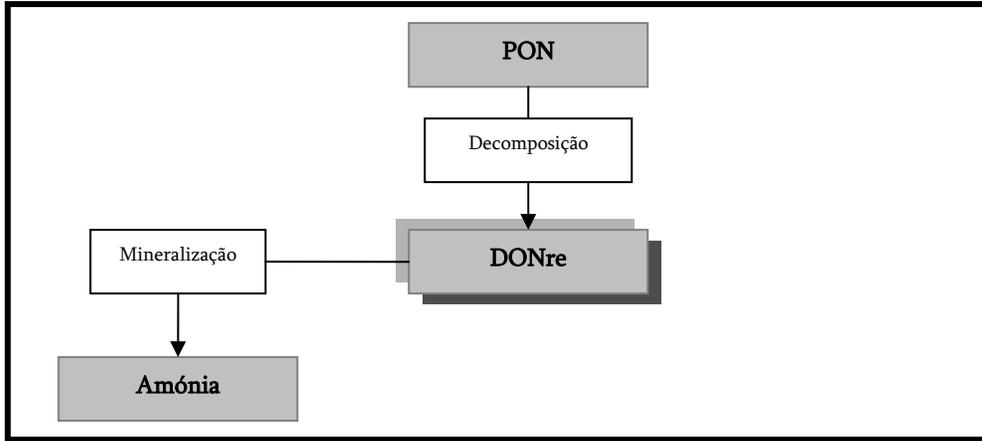


Figura I. 8. Processos relacionados com Azoto Orgânico Dissolvido Refractário.

$$\text{Eq. 8} \quad \frac{\partial \Phi_{DONre}}{\partial t} = \underbrace{(1 - f_{orgP}) K_{dec}^{PON} \Phi_{PON}}_{PON} - \underbrace{K_{min}^{DONre} \Phi_{DONre}}_{ammonia}$$

Tabela I. 9. Termos da equação de variação de biomassa das espécies de Azoto: designação e determinação .

Termo	Símbolo	Unidade	Equação
Factor de Preferência de Amónia	$\beta_{NH_4}^p$	-	$\beta_{NH_4}^p = \left( \frac{\Phi_{NH_4}}{K_N^p + \Phi_{NH_4}} \right) \left( \frac{\Phi_{NO_3}}{K_N^p + \Phi_{NO_3}} \right) + \left( \frac{\Phi_{NH_4}}{\Phi_{NH_4} + \Phi_{NO_3}} \right) \left( \frac{K_N^p}{K_N^p + \Phi_{NO_3}} \right)$
Taxa de Mineralização de DONre	$K_{min}^{DONre}$	d <sup>-1</sup>	$K_{min}^{DONre} = K_{min}^{DONre}(T_{ref}) \cdot \theta_{min}^{DONre(T-T_{ref})} \frac{\Phi_{phy}}{K_r^{phy} + \Phi_{phy}}$
Taxa de Mineralização do DONnr	$K_{min}^{DONnr}$	d <sup>-1</sup>	$K_{min}^{DONnr} = K_{min}^{DONnr}(T_{ref}) \cdot \theta_{min}^{DONnr(T-T_{ref})} \frac{\Phi_{phy}}{K_r^{phy} + \Phi_{phy}}$
Taxa de Decomposição de PON	$K_{dec}^{PON}$	d <sup>-1</sup>	$K_{dec}^{PON} = K_{dec}^{PON}(T_{ref}) \cdot \theta_{dec}^{(T-T_{ref})}$
Taxa de Nitrificação	$K_{nit}$	d <sup>-1</sup>	$K_{nit} = K_{nit}^{ref}(T_{ref}) \theta_{nit}^{(T-T_{ref})} \frac{\Phi_{Oxi}}{K_{nit}^{sat} + \Phi_{Oxi}}$
Taxa de Desnitrificação	$K_{dnit}$	d <sup>-1</sup>	$K_{dnit} = K_{dnit}^{ref}(T_{ref}) \theta_{dnit}^{(T-T_{ref})} \frac{c}{K_{dnit}^{sat} + \Phi_{Oxi}}$
Perda de Fitoplâncton na predação do Zooplâncton	$\delta_N^{phy}$	d <sup>-1</sup>	$\delta_N^{phy} = (1-E) \frac{\mu^{zoo}}{E} \alpha^{zoo} + \mu^{zoo} (\alpha^{phy} - \alpha^{zoo})$

**Tabela I. 10.** Parâmetros utilizados na simulação do ciclo do azoto (adaptado de Pina, 2001).

<b>Símbolo</b>	<b>Designação</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
$f_{orgP}$	Fracção Orgânica Particulada das Matéria orgânica	-	0,7
$T_{ref}$	Temperatura de Referência	°C	25
$K_{min}^{DONre}(T_{ref})$	Taxa de Referência para a Mineralização para DONre	d <sup>-1</sup>	0
$\theta_{min}^{DONre}$	Coefficiente de Temperatura para Mineralização de DONre	-	1,02
$K_{min}^{DONnr}(T_{ref})$	Taxa de Referência para a Mineralização para DONnr	d <sup>-1</sup>	0,1
$\theta_{min}^{DONnr}$	Coefficiente de Temperatura para Mineralização de DONnr	-	1,02
$K_r^{phy}$	Metade da Constantes de Saturação para a Regeneração dos Nutrientes	mg N.l <sup>-1</sup>	1,0
$K_{nit}(T_{ref})$	Taxa de Referência para a Nitrificação	-	0,06
$\theta_{nit}$	Coefficiente de Temperatura para a Nitrificação	-	1,08
$K_{nit}^{sat}$	Constante de Semi-saturação de Oxigénio para a nitrificação	-	0,014
$K_{dnt}(T_{ref})$	Taxa de Desnitrificação de Referência	d <sup>-1</sup>	0,125
$\theta_{dnt}$	Coefficiente de Temperatura de Desnitrificação	-	1,046
$K_{dnt}^{sat}$	Metade da Constante de Saturação para a Desnitrificação	mgO <sub>2</sub> .l <sup>-1</sup>	0,1
$K_{dec}(T_{ref})$	Taxa de Referência para a dissolução de PON	d <sup>-1</sup>	0,1
$\theta_{dec}$	Coefficiente de Temperatura de decomposição	-	1,02